

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Wind energy generation systems –

Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines

Systèmes de génération d'énergie éolienne –

Partie 12-1: Mesures de performance de puissance des éoliennes de production d'électricité



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –
Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind
turbines**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 12-1: Mesures de performance de puissance des éoliennes de production
d'électricité**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-3823-3

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD	13
INTRODUCTION	15
1 Scope	16
2 Normative references	16
3 Terms and definitions	17
4 Symbols and units	20
5 Power performance method overview	23
6 Preparation for performance test	27
6.1 General	27
6.2 Wind turbine and electrical connection	27
6.3 Test site	27
6.3.1 General	27
6.3.2 Location of the wind measurement equipment	27
6.3.3 Measurement sector	28
6.3.4 Correction factors and uncertainty due to flow distortion originating from topography	28
7 Test equipment	29
7.1 Electric power	29
7.2 Wind speed	29
7.2.1 General	29
7.2.2 General requirements for meteorological mast mounted anemometers	30
7.2.3 Top-mounted anemometers	31
7.2.4 Side-mounted anemometers	31
7.2.5 Remote sensing device (RSD)	31
7.2.6 Rotor equivalent wind speed measurement	32
7.2.7 Hub height wind speed measurement	32
7.2.8 Wind shear measurements	32
7.3 Wind direction	34
7.4 Air density	34
7.5 Rotational speed and pitch angle	35
7.6 Blade condition	35
7.7 Wind turbine control system	35
7.8 Data acquisition system	35
8 Measurement procedure	35
8.1 General	35
8.2 Wind turbine operation	35
8.3 Data collection	36
8.4 Data rejection	36
8.5 Database	37
9 Derived results	37
9.1 Data normalisation	37
9.1.1 General	37
9.1.2 Correction for meteorological mast flow distortion of side-mounted anemometer	38
9.1.3 Wind shear correction (when REWS measurements available)	38
9.1.4 Wind veer correction	41

9.1.5	Air density normalisation.....	41
9.1.6	Turbulence normalisation.....	42
9.2	Determination of the measured power curve	42
9.3	Annual energy production (<i>AEP</i>).....	43
9.4	Power coefficient	45
10	Reporting format.....	45
Annex A (normative) Assessment of influences caused by wind turbines and obstacles at the test site		52
A.1	General.....	52
A.2	Requirements regarding neighbouring and operating wind turbines	52
A.3	Requirements regarding obstacles	53
A.4	Method for calculation of sectors to exclude.....	53
A.5	Special requirements for extended obstacles	57
Annex B (normative) Assessment of terrain at the test site		58
Annex C (normative) Site calibration procedure		61
C.1	General.....	61
C.2	Overview of the procedure	61
C.3	Test set-up	63
C.3.1	Considerations for selection of the test wind turbine and location of the meteorological mast.....	63
C.3.2	Instrumentation.....	65
C.4	Data acquisition and rejection criteria	65
C.5	Analysis	66
C.5.1	Assessment of site shear conditions	66
C.5.2	Method 1: Bins of wind direction and wind shear.....	68
C.5.3	Method 2: Linear regression method where shear is not a significant influence.....	69
C.5.4	Additional calculations	69
C.6	Site calibration uncertainty.....	70
C.6.1	Site calibration category A uncertainty	70
C.6.2	Site calibration category B uncertainty	72
C.6.3	Combined uncertainty	72
C.7	Quality checks and additional uncertainties.....	72
C.7.1	Convergence check	72
C.7.2	Correlation check for linear regression (see C.5.3)	73
C.7.3	Change in correction between adjacent wind direction bins	73
C.7.4	Removal of the wind direction sensor between site calibration and power performance test	73
C.7.5	Site calibration and power performance measurements in different seasons	74
C.8	Verification of results	75
C.9	Site calibration examples	76
C.9.1	Example A	76
C.9.2	Example B	81
C.9.3	Example C	88
Annex D (normative) Evaluation of uncertainty in measurement.....		91
Annex E (informative) Theoretical basis for determining the uncertainty of measurement using the method of bins		94
E.1	General.....	94

E.2	Combining uncertainties.....	94
E.2.1	General	94
E.2.2	Expanded uncertainty	96
E.2.3	Basis for the uncertainty assessment.....	97
E.3	Category A uncertainties.....	100
E.3.1	General	100
E.3.2	Category A uncertainty in electric power.....	100
E.3.3	Category A uncertainties in the site calibration	101
E.4	Category B uncertainties: Introduction and data acquisition system	101
E.4.1	Category B uncertainties: Introduction	101
E.4.2	Category B uncertainties: data acquisition system	102
E.5	Category B uncertainties: Power output	102
E.5.1	General	102
E.5.2	Category B uncertainties: Power output – Current transformers	102
E.5.3	Category B uncertainties: Power output – Voltage transformers	103
E.5.4	Category B uncertainties: Power Output – Power transducer or other power measurement device	104
E.5.5	Category B uncertainties: Power output – Data acquisition	104
E.6	Category B uncertainties: Wind speed – Introduction and sensors	104
E.6.1	Category B uncertainties: Wind speed – Introduction	104
E.6.2	Category B uncertainties: Wind speed – Hardware	104
E.6.3	Category B uncertainties: Wind speed – Meteorological mast mounted sensors.....	105
E.7	Category B uncertainties: Wind speed – RSD	108
E.7.1	General	108
E.7.2	Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Calibration	108
E.7.3	Category B uncertainties: Wind speed – RSD – in-situ check.....	108
E.7.4	Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Classification	108
E.7.5	Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Mounting	110
E.7.6	Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Flow variation.....	110
E.7.7	Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Monitoring test	111
E.8	Category B uncertainties: Wind speed – REWS	112
E.8.1	General	112
E.8.2	Category B uncertainties: Wind speed – REWS – Wind speed measurement over whole rotor.....	112
E.8.3	Category B uncertainties: Wind speed – REWS – Wind veer.....	113
E.9	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain	113
E.9.1	General	113
E.9.2	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Pre-calibration.....	114
E.9.3	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Post-calibration	114
E.9.4	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Classification.....	115
E.9.5	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Mounting	116
E.9.6	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Lightning finial.....	116
E.9.7	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Data acquisition	117
E.9.8	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Change in correction between adjacent bins	117
E.9.9	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Removal of WD sensor	117
E.9.10	Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Seasonal variation.....	117
E.10	Category B uncertainties: Air density	118

E.10.1	General	118
E.10.2	Category B uncertainties: Air density – Temperature introduction	118
E.10.3	Category B uncertainties: Air density – Temperature – Calibration	119
E.10.4	Category B uncertainties: Air density – Temperature – Radiation shielding	119
E.10.5	Category B uncertainties: Air density – Temperature – Mounting	119
E.10.6	Category B uncertainties: Air density – Temperature – Data acquisition	119
E.10.7	Category B uncertainties: Air density – Pressure introduction	120
E.10.8	Category B uncertainties: Air density – Pressure – Calibration	120
E.10.9	Category B uncertainties: Air density – Pressure – Mounting	121
E.10.10	Category B uncertainties: Air density – Pressure – Data acquisition	121
E.10.11	Category B uncertainties: Air density – Relative humidity introduction	121
E.10.12	Category B uncertainties: Air density – Relative humidity – Calibration	122
E.10.13	Category B uncertainties: Air density – Relative humidity – Mounting	122
E.10.14	Category B uncertainties: Air Density – Relative humidity – Data acquisition	122
E.10.15	Category B uncertainties: Air density – Correction	122
E.11	Category B uncertainties: Method	123
E.11.1	General	123
E.11.2	Category B uncertainties: Method – Wind conditions	123
E.11.3	Category B uncertainties: Method – Seasonal effects	128
E.11.4	Category B uncertainties: Method – Turbulence normalisation (or the lack thereof)	129
E.11.5	Category B uncertainties: Method – Cold climate	129
E.12	Category B uncertainties: Wind direction	130
E.12.1	General	130
E.12.2	Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic	130
E.12.3	Category B uncertainties: Wind direction – RSD	132
E.13	Combining uncertainties	133
E.13.1	General	133
E.13.2	Combining Category B uncertainties in electric power ($u_{P,i}$)	133
E.13.3	Combining uncertainties in the wind speed measurement ($u_{V,i}$)	133
E.13.4	Combining uncertainties in the wind speed measurement from cup or sonic ($u_{VS,i}$)	133
E.13.5	Combining uncertainties in the wind speed measurement from RSD ($u_{VR,i}$)	134
E.13.6	Combining uncertainties in the wind speed measurement from REWS ($u_{REWS,i}$)	134
E.13.7	Combining uncertainties in the wind speed measurement for REWS for either a meteorological mast significantly above hub height or an RSD with a lower-than-hub-height meteorological mast	135
E.13.8	Combining uncertainties in the wind speed measurement for REWS for a hub height meteorological mast + RSD for shear using an absolute wind speed	138
E.13.9	Combining uncertainties in the wind speed measurement for REWS for a hub height meteorological mast and RSD for shear using a relative wind speed	139
E.13.10	Combining uncertainties in the wind speed measurement from REWS due to wind veer across the whole rotor $u_{REWS,veer,i}$	141
E.13.11	Combining uncertainties in the wind speed measurement from flow distortion due to site calibration $u_{VT,i}$	144
E.13.12	Combining uncertainties for the temperature measurement $u_{T,i}$	145

E.13.13	Combining uncertainties for the pressure measurement $u_{B,i}$	146
E.13.14	Combining uncertainties for the humidity measurement $u_{RH,i}$	146
E.13.15	Combining uncertainties for the method related components $u_{M,i}$	147
E.13.16	Combining uncertainties for the wind direction measurement with wind vane or sonic anemometer $u_{WV,i}$	147
E.13.17	Combining uncertainties for the wind direction measurement with RSD $u_{WR,i}$	147
E.13.18	Combined category B uncertainties.....	148
E.13.19	Combined standard uncertainty – Power curve	148
E.13.20	Combined standard uncertainty – Energy production	148
E.14	Relevance of uncertainty components under specified conditions	148
E.15	Reference tables.....	149
Annex F (normative)	Wind tunnel calibration procedure for anemometers	153
F.1	General requirements	153
F.2	Requirements to the wind tunnel.....	153
F.3	Instrumentation and calibration set-up requirements	155
F.4	Calibration procedure.....	155
F.4.1	General procedure cup and sonic anemometers	155
F.4.2	Procedure for the calibration of sonic anemometers.....	156
F.4.3	Determination of the wind speed at the anemometer position	156
F.5	Data analysis	157
F.6	Uncertainty analysis.....	157
F.7	Reporting format.....	158
F.8	Example uncertainty calculation.....	159
Annex G (normative)	Mounting of instruments on the meteorological mast.....	162
G.1	General.....	162
G.2	Single top-mounted anemometer.....	162
G.3	Side-by-side top-mounted anemometers	164
G.4	Side-mounted instruments	166
G.4.1	General	166
G.4.2	Tubular meteorological masts	167
G.4.3	Lattice meteorological masts	169
G.5	Lightning protection	174
G.6	Mounting of other meteorological instruments	174
Annex H (normative)	Power performance testing of small wind turbines.....	175
H.1	General.....	175
H.2	Definitions.....	175
H.3	Wind turbine system definition and installation	175
H.4	Meteorological mast location.....	176
H.5	Test equipment	177
H.6	Measurement procedure	177
H.7	Derived results.....	178
H.8	Reporting.....	179
H.9	Annex A – Assessment of influence cause by wind turbines and obstacles at the test site	179
H.10	Annex B – Assessment of terrain at test site	179
H.11	Annex C – Site calibration procedure	179
Annex I (normative)	Classification of cup and sonic anemometry	180
I.1	General.....	180

I.2	Classification classes.....	180
I.3	Influence parameter ranges	181
I.4	Classification of cup and sonic anemometers.....	181
I.5	Reporting format.....	183
Annex J (normative)	Assessment of cup and sonic anemometry	184
J.1	General.....	184
J.2	Measurements of anemometer characteristics	184
J.2.1	Measurements in a wind tunnel for tilt angular response characteristics of cup anemometers	184
J.2.2	Wind tunnel measurements of directional characteristics of cup anemometers.....	185
J.2.3	Wind tunnel measurements of cup anemometer rotor torque characteristics	186
J.2.4	Wind tunnel measurements of step responses of cup anemometers	186
J.2.5	Measurement of temperature induced effects on anemometer performance	187
J.2.6	Wind tunnel measurements of directional characteristics of sonic anemometers.....	189
J.3	A cup anemometer classification method based on wind tunnel and laboratory tests and cup anemometer modelling	189
J.3.1	Method	189
J.3.2	Example of a cup anemometer model	189
J.4	A sonic anemometer classification method based on wind tunnel tests and sonic anemometer modelling.....	196
J.5	Free field comparison measurements.....	197
Annex K (normative)	In-situ comparison of anemometers.....	198
K.1	General.....	198
K.2	Prerequisite	198
K.3	Analysis method	198
K.4	Evaluation criteria	199
Annex L (normative)	The application of remote sensing technology	202
L.1	General.....	202
L.2	Classification of remote sensing devices	203
L.2.1	General	203
L.2.2	Data acquisition.....	203
L.2.3	Data preparation.....	204
L.2.4	Principle and requirements of a sensitivity test	205
L.2.5	Assessment of environmental variable significance.....	211
L.2.6	Assessment of interdependency between environmental variables	212
L.2.7	Calculation of accuracy class.....	214
L.2.8	Acceptance criteria	216
L.2.9	Classification of RSD	217
L.3	Verification of the performance of remote sensing devices	217
L.4	Evaluation of uncertainty of measurements of remote sensing devices	220
L.4.1	General	220
L.4.2	Reference uncertainty.....	220
L.4.3	Uncertainty resulting from the RSD calibration test	220
L.4.4	Uncertainty due to remote sensing device classification.....	222
L.4.5	Uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume.....	223

L.4.6	Uncertainty due to mounting effects.....	223
L.4.7	Uncertainty due to variation in flow across the site	223
L.5	Additional checks.....	224
L.5.1	Monitoring the performance of the remote sensing device at the application site	224
L.5.2	Identification of malfunctioning of the remote sensing device	224
L.5.3	Consistency check of the assessment of the remote sensing device systematic uncertainties	224
L.5.4	In-situ test of the remote sensing device.....	225
L.6	Other requirements specific to power curve testing	225
L.7	Reporting	227
L.7.1	Common reporting on classification test, calibration test, and monitoring of the remote sensing device during application.....	227
L.7.2	Additional reporting on classification test.....	227
L.7.3	Additional reporting on calibration test.....	228
L.7.4	Additional reporting on application	228
Annex M (informative)	Normalisation of power curve data according to the turbulence intensity	229
M.1	General.....	229
M.2	Turbulence normalisation procedure	229
M.3	Determination of the zero turbulence power curve.....	231
M.4	Order of wind shear correction (normalisation) and turbulence normalisation	236
M.5	Uncertainty of turbulence normalisation or of power curves due to turbulence effects.....	236
Annex N (informative)	Wind tunnel calibration procedure for wind direction sensors	238
N.1	General.....	238
N.2	General requirements	238
N.3	Requirements of the wind tunnel.....	238
N.4	Instrumentation and calibration set-up requirements	239
N.5	Calibration procedure.....	240
N.6	Data analysis	241
N.7	Uncertainty analysis.....	241
N.8	Reporting format.....	241
N.9	Example of uncertainty calculation	243
N.9.1	General	243
N.9.2	Measurement uncertainties generated by determination of the flow direction in the wind tunnel	243
N.9.3	Contribution to measurement uncertainty by the wind direction sensor	244
N.9.4	Result of the uncertainty calculation	245
Annex O (informative)	Power performance testing in cold climate	248
O.1	General.....	248
O.2	Recommendations	248
O.2.1	General	248
O.2.2	Sonic anemometers	248
O.2.3	Cup anemometers	248
O.3	Uncertainties.....	249
O.4	Reporting	249
Annex P (informative)	Wind shear normalisation procedure	250
P.1	General.....	250

Annex Q (informative) Definition of the rotor equivalent wind speed under consideration of wind veer	252
Q.1 General.....	252
Q.2 Definition of rotor equivalent wind speed under consideration of wind veer	253
Q.3 Measurement of wind veer	253
Q.4 Combined wind shear and wind veer normalisation	253
Annex R (informative) Uncertainty considerations for tests on multiple turbines	254
R.1 General.....	254
Annex S (informative) Mast flow distortion correction for lattice masts	258
Bibliography.....	261

Figure 1 – Requirements as to distance of the wind measurement equipment and maximum allowed measurement sectors	28
Figure 2 – Wind shear measurement heights appropriate to measurement of rotor equivalent wind speed	33
Figure 3 – Wind shear measurement heights when no wind speed measurements above hub height are available (for wind shear exponent determination only)	34
Figure 4 – Process of application of the various normalisations	38
Figure 5 – Presentation of example database: power performance test scatter plot sampled at 1 Hz (mean values averaged over 10 min)	48
Figure 6 – Presentation of example measured power curve	49
Figure 7 – Presentation of example C_p curve.....	49
Figure A.1 – Sectors to exclude due to wakes of neighbouring and operating wind turbines and significant obstacles	55
Figure A.2 – An example of sectors to exclude due to wakes of the wind turbine under test, a neighbouring and operating wind turbine and a significant obstacle.....	56
Figure B.1 – Illustration of area to be assessed, top view.....	58
Figure B.2 – Example of determination of slope and terrain variation from the best-fit plane: “ $2L$ to $4L$ ” and the case “measurement sector” (Table B.1, line 2).....	59
Figure B.3 – Determination of slope for the distance “ $2L$ to $4L$ ” and “ $8L$ to $16L$ ” and the case “outside measurement sector” (Table B.1, line 3 and line 5)	60
Figure C.1 – Site calibration flow chart.....	62
Figure C.2 – Terrain types	64
Figure C.3 – Example of the results of a verification test.....	76
Figure C.4 – Wind shear exponent vs. time of day, example A	77
Figure C.5 – Wind shear exponents at wind turbine location vs. reference meteorological mast, example A where the colour axis = wind speed (m/s)	78
Figure C.6 – Wind speed ratios and number of data points vs. wind shear exponent and wind direction bin – wind speed ratios (full lines), number of data points (dotted lines)	79
Figure C.7 – Data convergence check for 190° bin.....	81
Figure C.8 – Wind shear exponent vs. time of day, example B	82
Figure C.9 – Wind shear exponents at wind turbine location vs. reference meteorological mast, example B	82
Figure C.10 – Linear regression of wind turbine location vs. reference meteorological mast hub height wind speeds for 330° bin	83
Figure C.11 – Wind speed ratios vs. wind speed for the 330° bin	83
Figure C.12 – Wind speed ratios vs. wind shear for the 330° bin	84

Figure C.13 – Wind shear exponents at wind turbine location vs. reference meteorological mast post-filtering	85
Figure C.14 – Linear regression of wind turbine location vs. reference meteorological mast hub height wind speeds for 330° bin, post-filtering.....	85
Figure C.15 – Wind speed ratios vs. wind speed for the 330° bin, post-filtering	86
Figure C.16 – Data convergence check for 330° bin.....	87
Figure C.17 – Site calibration wind shear vs. power curve test wind shear	88
Figure C.18 – Convergence check for 270° bin	90
Figure F.1 – Definition of volume for flow uniformity test – The volume will also extend 1,5 x b in depth (along the flow)	154
Figure G.1 – Example of a top-mounted anemometer and requirements for mounting	164
Figure G.2 – Example of alternative top-mounted primary and control anemometers positioned side-by-side and wind vane and other instruments on the boom.....	166
Figure G.3 – Iso-speed plot of local flow speed around a cylindrical meteorological mast	168
Figure G.4 – Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a tubular meteorological mast and meteorological mast diameter d	169
Figure G.5 – Representation of a three-legged lattice meteorological mast	169
Figure G.6 – Iso-speed plot of local flow speed around a triangular lattice meteorological mast with a C_T of 0,5	170
Figure G.7 – Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a triangular lattice meteorological mast of leg distance L_m for various C_T values	171
Figure G.8 – 3D CFD derived flow distortion for two different wind directions around a triangular lattice meteorological mast ($C_T = 0,27$) – For flow direction see the red arrow lower left in each figure.....	173
Figure H.1 – Definition of hub height and meteorological mast location for vertical axis wind turbines	177
Figure J.1 – Tilt angular response $V_\alpha/V_{\alpha=0}$ of a cup anemometer as function of flow angle α compared to cosine response	185
Figure J.2 – Wind tunnel torque measurements $Q_A - Q_F$ as function of angular speed ω of a cup anemometer rotor at 8 m/s	186
Figure J.3 – Example of bearing friction torque Q_F as function of temperature for a range of angular speeds ω	188
Figure J.4 – Example of rotor torque coefficient C_{QA} as function of speed ratio λ derived from step responses with K_{low} equal to –5,5 and K_{high} equal to –6,5	191
Figure J.5 – Classification deviations of example cup anemometer showing a class 1,69A (upper) and a class 6,56B (lower)	195
Figure J.6 – Classification deviations of example cup anemometer showing a class 8,01C (upper) and a class 9,94D (lower).....	196
Figure K.1 – Example with triangular lattice meteorological mast	200
Figure K.2 – Example with tubular meteorological mast	201
Figure L.1 – Deviation vs upflow angle determined for a remote sensing device with respect to the cup anemometer in Figure J.1	207
Figure L.2 – Example of sensitivity analysis against wind shear	209
Figure L.3 – Example of wind shear versus turbulence intensity.....	213
Figure L.4 – Example of percentage deviation of remote sensing device and reference sensor measurements versus turbulence intensity	213

Figure L.5 – Comparison of 10 minute averages of the horizontal wind speed component as measured by a remote sensing device and a cup anemometer	219
Figure L.6 – Bin-wise comparison of measurement of the horizontal wind speed component of a remote sensing device and a cup anemometer.....	219
Figure L.7 – Example of permitted range of locations for measurement volume	226
Figure M.1 – Process for obtaining a power curve for a specific turbulence intensity ($I_{\text{reference}}$).....	230
Figure M.2 – Process for obtaining the initial zero turbulence power curve parameters from the measured data	232
Figure M.3 – First approach for initial zero turbulence power curve.....	232
Figure M.4 – Process for obtaining the theoretical zero-turbulence power curve from the measured data	234
Figure M.5 – Adjusted initial zero turbulence power curve (green) compared to first approach (red)	235
Figure M.6 – Process for obtaining the final zero-turbulence power curve from the measured data.....	235
Figure M.7 – Adjusted initial zero turbulence power curve (green) compared to final zero turbulence power curve (black)	236
Figure N.1 – Example of calibration setup of a wind direction sensor in a wind tunnel.....	240
Figure Q.1 – Wind profiles measured with LIDAR over flat terrain	252
Figure S.1 – Example of mast flow distortion	258
Figure S.2 – Flow distortion residuals versus direction.....	260
Table 1 – Overview of wind measurement configurations for power curve measurements that meet the requirements of this standard	26
Table 2 – Wind speed measurement configurations (X indicates allowable configuration).....	30
Table 3 – Example of REWS calculation	40
Table 4 – Example of presentation of a measured power curve.....	50
Table 5 – Example of presentation of estimated annual energy production	51
Table A.1 – Obstacle requirements: relevance of obstacles	53
Table B.1 – Test site requirements: topographical variations.....	59
Table C.1 – Site calibration flow corrections (wind speed ratio).....	80
Table C.2 – Site calibration data count	80
Table C.3 – r^2 values for each wind direction bin.....	87
Table C.4 – Additional uncertainty due to change in bins	87
Table C.5 – Additional uncertainty due to change in bins	90
Table D.1 – List of uncertainty components	91
Table E.1 – Expanded uncertainties.....	96
Table E.2 – List of category A and B uncertainties	98
Table E.3 – Example of standard uncertainties due to absence of a wind shear measurement.....	125
Table E.4 – Example of standard uncertainties due to absence of a wind veer measurement.....	127
Table E.5 – Uncertainty contributions due to lack of upflow knowledge	128
Table E.6 – Uncertainty contributions due to lack of turbulence knowledge	128

Table E.7 – Suggested assumptions for correlations of measurement uncertainties between different measurement heights	137
Table E.8 – Suggested correlation assumptions for relative wind direction measurement uncertainties at different measurement heights	143
Table E.9 – Uncertainties from air density normalisation	149
Table E.10 – Sensitivity factors	151
Table E.11 – Category B uncertainties	152
Table F.1 – Example of evaluation of anemometer calibration uncertainty	159
Table G.1 – Estimation method for C_T for various types of lattice mast	171
Table H.1 – Battery bank voltage settings	178
Table I.1 – Influence parameter ranges (10 min averages) of Classes A, B, C, D and S	182
Table J.1 – Tilt angle response of example cup anemometer	193
Table J.2 – Friction coefficients of example cup anemometer	194
Table J.3 – Miscellaneous data related to classification of example cup anemometer	194
Table L.1 – Bin width example for a list of environmental variables	208
Table L.2 – Parameters derived from a sensitivity analysis of a remote sensing device	210
Table L.3 – Ranges of environmental parameters for sensitivity analysis	211
Table L.4 – Example selection of environmental variables found to have a significant influence	212
Table L.5 – Sensitivity analysis parameters remaining after analysis of interdependency of variables	214
Table L.6 – Example scheme for calculating maximum influence of environmental variables	215
Table L.7 – Preliminary accuracy classes of a remote sensing device considering both all and only the most significant influential variables	216
Table L.8 – Example final accuracy classes of a remote sensing device	216
Table L.9 – Example of uncertainty calculations arising from calibration of a remote sensing device (RSD) in terms of systematic uncertainties	221
Table N.1 – Uncertainty contributions in wind directions sensor calibration	246
Table N.2 – Uncertainty contributions and total standard uncertainty in wind direction sensor calibration	247
Table R.1 – List of correlated uncertainty components	255

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –**Part 12-1: Power performance measurements
of electricity producing wind turbines****FOREWORD**

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61400-12-1 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind energy generation systems.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2005. This edition constitutes a technical revision. This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) new definition of wind speed,
- b) inclusion of wind shear and wind veer,
- c) revision of air density correction,
- d) revision of site calibration,
- e) revision to definition of power curve,
- f) interpolation to bin centre method,
- g) revision of obstacle model,

- h) clarification of topography requirements,
- i) new annex on mast induced flow distortion,
- j) revision to anemometer classifications,
- k) inclusion of ultrasonic anemometers,
- l) cold climate annex added,
- m) database A changed to special database,
- n) revision of uncertainty annex,
- o) inclusion of remote sensing.

IEC 61400-12-2 is an addition to IEC 61400-12-1.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
88/610/FDIS	88/617/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

A list of all parts in the IEC 61400, published under the general title *Wind energy generation systems*, can be found on the IEC website.

Future standards in this series will carry the new general title as cited above. Titles of existing standards in this series will be updated at the time of the next edition.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee recognizes that this revision represents a significant increase in complexity and perhaps greater difficulty to implement. However, it represents the committee's best attempt to address issues introduced by larger wind turbines operating in significant wind shear and complex terrain. The committee recommends that the new techniques introduced be validated immediately by test laboratories through inter-lab proficiency testing. The committee recommends a Review Report be written within three years of the release of this document which includes recommendations, clarifications and simplifications that will improve the practical implementation of this standard. If necessary a revision should be proposed at the same time to incorporate these recommendations, clarifications and simplifications.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

The purpose of this part of IEC 61400 is to provide a uniform methodology that will ensure consistency, accuracy and reproducibility in the measurement and analysis of power performance by wind turbines. The standard has been prepared with the anticipation that it would be applied by:

- a) a wind turbine manufacturer striving to meet well-defined power performance requirements and/or a possible declaration system;
- b) a wind turbine purchaser in specifying such performance requirements;
- c) a wind turbine operator who may be required to verify that stated, or required, power performance specifications are met for new or refurbished units;
- d) a wind turbine planner or regulator who shall be able to accurately and fairly define power performance characteristics of wind turbines in response to regulations or permit requirements for new or modified installations.

This document provides guidance in the measurement, analysis, and reporting of power performance testing for wind turbines. The document will benefit those parties involved in the manufacture, installation planning and permitting, operation, utilization, and regulation of wind turbines. The technically accurate measurement and analysis techniques recommended in this standard should be applied by all parties to ensure that continuing development and operation of wind turbines is carried out in an atmosphere of consistent and accurate communication relative to wind turbine performance. This document presents measurement and reporting procedures expected to provide accurate results that can be replicated by others. Meanwhile, a user of the standard should be aware of differences that arise from large variations in wind shear and turbulence. Therefore, a user should consider the influence of these differences and the data selection criteria in relation to the purpose of the test before contracting the power performance measurements.

A key element of power performance testing is the measurement of wind speed. This document prescribes the use of cup or sonic anemometers or remote sensing devices (RSD) in conjunction with anemometers to measure wind. Even though suitable procedures for calibration/validation and classification are adhered to, the nature of the measurement principle of these devices may potentially cause them to perform differently. These instruments are robust and have been regarded as suitable for this kind of test with the limitation of some of them to certain classes of terrain.

Recognising that, as wind turbines become ever larger, a wind speed measured at a single height is increasingly unlikely to accurately represent the wind speed through the entire turbine rotor, this standard introduces an additional definition of wind speed. Whereas previously wind speed was defined as that measured at hub height only, this may now be supplemented with a so called Rotor Equivalent Wind Speed (REWS) defined by an arithmetic combination of simultaneous measurements of wind speed at a number of heights spanning the complete rotor diameter between lower tip and upper tip. The power curves defined by hub height wind speed and REWS are not the same and so the hub height wind speed power curve is always presented for comparison whenever a REWS power curve is measured. As a consequence of this difference in wind speed definition, the annual energy production (*AEP*) derived from the combination of a measured power curve with a wind speed distribution uses an identical definition of wind speed in both the power curve and the wind speed distribution.

Procedures to classify cup anemometers and ultrasonic anemometers are given in Annexes I and J. Procedures to classify remote sensing devices are given in Annex L. Special care should be taken in the selection of the instruments chosen to measure the wind speed because it can influence the result of the test.

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines

1 Scope

This part of IEC 61400 specifies a procedure for measuring the power performance characteristics of a single wind turbine and applies to the testing of wind turbines of all types and sizes connected to the electrical power network. In addition, this standard describes a procedure to be used to determine the power performance characteristics of small wind turbines (as defined in IEC 61400-2) when connected to either the electric power network or a battery bank. The procedure can be used for performance evaluation of specific wind turbines at specific locations, but equally the methodology can be used to make generic comparisons between different wind turbine models or different wind turbine settings when site-specific conditions and data filtering influences are taken into account.

The wind turbine power performance characteristics are determined by the measured power curve and the estimated annual energy production (*AEP*). The measured power curve, defined as the relationship between the wind speed and the wind turbine power output, is determined by collecting simultaneous measurements of meteorological variables (including wind speed), as well as wind turbine signals (including power output) at the test site for a period that is long enough to establish a statistically significant database over a range of wind speeds and under varying wind and atmospheric conditions. The *AEP* is calculated by applying the measured power curve to reference wind speed frequency distributions, assuming 100 % availability.

This document describes a measurement methodology that requires the measured power curve and derived energy production figures to be supplemented by an assessment of uncertainty sources and their combined effects.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60688:2012, *Electrical measuring transducers for converting A.C. and D.C. electrical quantities to analogue or digital signals*

IEC 61400-12-2:2013, *Wind turbines – Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry*

IEC 61869-1:2007, *Instrument transformers – Part 1: General requirements*

IEC 61869-2:2012, *Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers*

IEC 61869-3:2011, *Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers*

ISO/IEC GUIDE 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

ISO/IEC 17043:2010, *Conformity assessment – General requirements for proficiency testing*

ISO 2533:1975, *Standard atmosphere*

ISO 3966:2008, *Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

accuracy

closeness of the agreement between the result of a measurement and a true value of the measurand

3.2

annual energy production

AEP

estimate of the total energy production of a wind turbine during a one-year period by applying the measured power curve to different reference wind speed frequency distributions at hub height, assuming 100 % availability

3.3

atmospheric stability

a measure of tendency of the wind to encourage or suppress vertical mixing

Note 1 to entry: Stable atmosphere is characterized by a high temperature gradient with altitude, high wind shear, possible wind veer and low turbulence relative to unstable conditions. Neutral and unstable atmosphere generally result in lower temperature gradients and low wind shear.

3.4

complex terrain

terrain surrounding the test site that features significant variations in topography and terrain obstacles (refer to 3.18) that may cause flow distortion

3.5

cut-in wind speed

the lowest wind speed at which a wind turbine will begin to produce power

3.6

cut-out wind speed

the wind speed at which a wind turbine cuts out from the grid due to high wind speed

3.7

data set

a collection of data sampled over a continuous period

3.8

distance constant

indication of the response time of an anemometer, defined as the length of air that shall pass the instrument for it to indicate 63 % of the final value for a step input in wind speed

3.9

extrapolated power curve

extension of the measured power curve by estimating power output from the maximum measured wind speed to cut-out wind speed

3.10

flow distortion

change in air flow caused by obstacles, topographical variations, or other wind turbines that results in the wind speed at the measurement location to be different from the wind speed at the wind turbine location

3.11

hub height (of wind turbines)

height of the centre of the swept area of the wind turbine rotor above the ground at the tower

Note 1 to entry: For a vertical axis wind turbine the hub height is defined as the height of the centroid of the swept area of the rotor above the ground at the tower.

3.12

measured power curve

table and graph that represents the measured, corrected and normalized net power output of a wind turbine as a function of measured wind speed, measured under a well-defined measurement procedure

3.13

measurement period

period during which a statistically significant database has been collected for the power performance test

3.14

measurement sector

a sector of wind directions from which data are selected for the measured power curve

3.15

method of bins

data reduction procedure that groups test data for a certain parameter into intervals (bins)

Note 1 to entry: For each bin, the number of data sets or samples and their sum are recorded, and the average parameter value within each bin is calculated.

3.16

net active electric power

measure of the wind turbine electric power output that is delivered to the electrical power network

3.17

normal maintenance

any intervention which is done according to a defined regular maintenance program, independent from the fact that a power performance test is being done, e.g. oil change, blade washing (if due anyway, i.e. independent from the power performance test) and any intervention which is out of the scope of the regular maintenance program (e.g. repair of a failed component) and which is not a machine configuration change

3.18**obstacles**

obstructions that block the wind and create distortion of the flow, such as buildings and trees

3.19**pitch angle**

angle between the chord line at a defined blade radial location (usually 100 % of the blade radius) and the rotor plane of rotation

3.20**power coefficient**

ratio of the net electric power output of a wind turbine to the power available in the free stream wind over the rotor swept area

3.21**power performance**

measure of the capability of a wind turbine to produce electric power and energy

3.22**rated power**

quantity of power assigned, generally by a manufacturer, for a specified operating condition of a component, device or equipment

3.23**rotor equivalent wind speed**

wind speed corresponding to the kinetic energy flux through the swept rotor area when accounting for the variation of the wind speed with height, as represented in Equation (5)

3.24**special maintenance**

any intervention which is out of the scope of the regular maintenance program and which is not a machine configuration change, i.e. any intervention which is done in order to improve the power performance during a test period, e.g. an unscheduled blade washing, any replacement of an essential component

3.25**standard uncertainty**

uncertainty of the result of a measurement expressed as a standard deviation

3.26**swept area**

for a horizontal axis wind turbine, the projected area of the moving rotor upon a plane normal to axis of rotation

Note 1 to entry: For teetering rotors, it should be assumed that the rotor remains normal to the low-speed shaft. For a vertical axis wind turbine, the projected area of the moving rotor upon a vertical plane.

3.27**test site**

location of the wind turbine under test and its surroundings

3.28**uncertainty in measurement**

parameter, associated with the result of a measurement, which characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand

3.29**wind measurement equipment**

meteorological mast or remote sensing device

3.30**wind shear**

change of wind speed with height across the wind turbine rotor

3.31**wind shear exponent**

exponent α of the power law defining the variation of wind speed with height

Note 1 to entry: This parameter is used as a measure of the magnitude of wind shear for site calibration in Annex C and may be otherwise useful. The power law equation is

$$v_{zi} = v_h \left(\frac{z_i}{H} \right)^\alpha \quad (1)$$

where

v_h is the hub height wind speed;

H is the hub height (m);

v_{zi} is the wind speed at height z_i ;

α is the wind shear exponent.

3.32**wind veer**

change of wind direction with height across the wind turbine rotor

4 Symbols and units

A	swept area of the wind turbine rotor	[m ²]
A_i	area of the i^{th} wind turbine rotor segment	[m ²]
A_w	Weibull scale factor	[m/s]
AEP	annual energy production	[Wh]
B	barometric pressure	[Pa]
$B_{10\text{min}}$	measured air pressure averaged over 10 min	[Pa]
Ch	pitot tube head coefficient	
$C_{P,i}$	power coefficient in bin i	
C_{QA}	generalized aerodynamic torque coefficient	
C_T	thrust coefficient	
c	sensitivity factor of a parameter (the partial differential)	
$c_{B,i}$	sensitivity factor of air pressure in bin i	[W/Pa]
$c_{d,i}$	sensitivity factor of data acquisition system in bin i	
c_{index}	sensitivity factor of index parameter	
$c_{k,i}$	sensitivity factor of component k in bin i	
$c_{T,i}$	sensitivity factor of air temperature in bin i	[W/K]
$c_{V,i}$	sensitivity factor of wind speed in bin i	[Ws/m]
$c_{\rho,i}$	sensitivity factor of air density correction in bin i	[Wm ³ /kg]
D	rotor diameter	[m]
D_e	equivalent rotor diameter	[m]
D_n	rotor diameter of neighbouring and operating wind turbine	[m]
d	meteorological mast diameter	[m]
$F(V)$	the Rayleigh cumulative probability distribution function for wind speed	
f_i	the relative occurrence of wind speed in a wind speed interval	

$f_{r,MM}$	wind shear correction factor, measured using meteorological mast mounted instruments	
$f_{r,RSD}$	wind shear correction factor, measured using a remote sensing device	
H	hub height of wind turbine	[m]
h	height of obstacle	[m]
I	inertia of cup anemometer rotor	[kgm ²]
k	class number	
k	Weibull shape factor	
k_b	blockage correction factor	
k_c	wind tunnel calibration factor	
k_f	wind tunnel correction factor to other tunnels (only used in uncertainty estimate)	
k_ρ	humidity correction to density	
$K_{B,t}$	barometer sensitivity	[N/m ² V]
$K_{B,s}$	barometer gain	
$K_{B,d}$	barometer sampling conversion	
$K_{T,t}$	temperature transducer sensitivity	[K/A]
$K_{T,s}$	temperature transducer gain	[A/V]
$K_{T,d}$	temperature transducer sampling conversion	
$K_{p,t}$	pressure transducer sensitivity	
$K_{p,s}$	pressure transducer gain	
$K_{p,d}$	pressure transducer sampling conversion	
L_m	distance between adjacent legs of lattice meteorological mast	[m]
L	distance between the wind turbine and the wind measurement equipment	[m]
L_e	distance between the wind turbine or the wind measurement equipment and an obstacle	[m]
L_n	distance between the wind turbine or the wind measurement equipment and a neighbouring and operating wind turbine	[m]
l_h	height of obstacle	[m]
l_w	width of obstacle	[m]
M	number of uncertainty components in each bin	
M_A	number of category A uncertainty components	
M_B	number of category B uncertainty components	
N	number of bins	
N_h	number of hours in one year $\approx 8\,760$	[h]
N_i	number of 10 min data sets in wind speed bin i	
N_j	number of 10 min data sets in wind direction bin j	
n	number of samples within sampling interval	
n_h	number of available measurement heights	
P_o	porosity of obstacle (0: solid, 1: no obstacle)	
P_i	normalized and averaged power output in bin i	[W]
P_n	normalized power output	[W]
$P_{n,i,j}$	normalized power output of data set j in bin i	[W]
P_{10min}	measured power averaged over 10 min	[W]
P_w	vapour pressure	[Pa]
Q_A	aerodynamic torque	[Nm]

Q_f	friction torque	[Nm]
R	rotor radius	[m]
R_0	gas constant of dry air (287,05)	[J/kgK]
R_d	distance to meteorological mast centre	[m]
R_w	gas constant of water vapour (461,5)	[J/kgK]
RSD	remote sensing device	
r	correlation coefficient	
s	category A standard uncertainty component	
s_A	category A standard uncertainty of tunnel wind speed time series	
$s_{k,i}$	category A standard uncertainty of component k in bin i	
s_i	combined category A uncertainties in bin i	
$s_{P,i}$	category A standard uncertainty of power in bin i	[W]
s_{sc}	category A standard uncertainty of site calibration	[m/s]
$s_{w,i}$	category A standard uncertainty of climatic variations	[Wh]
$s_{\alpha,j}$	category A standard uncertainty of wind speed ratios in bin j	
S	meteorological mast solidity	
T	absolute temperature	[K]
TI	turbulence intensity	
T_{10min}	measured absolute air temperature averaged over 10 min	[K]
t	time	[s]
U	wind speed	[m/s]
U_d	centreline wind speed deficit	[m/s]
U_{eq}	equivalent horizontal wind speed	[m/s]
U_i	wind speed in bin i	[m/s]
U_t	threshold wind speed	[m/s]
U	wind speed vector	
u	category B standard uncertainty component	
u_{AEP}	combined standard uncertainty in the estimated annual energy production	[Wh]
$u_{B,i}$	category B standard uncertainty of air pressure in bin i	[Pa]
$u_{C,i}$	combined standard uncertainty of the power in bin i	[W]
u_i	combined category B uncertainties in bin i	
u_{index}	category B standard uncertainty of index parameter	
$u_{k,i}$	category B standard uncertainty of component k in bin i	
$u_{P,i}$	category B standard uncertainty of power in bin i	[W]
$u_{V,i}$	category B standard uncertainty of wind speed in bin i	[m/s]
$u_{T,i}$	category B standard uncertainty of air temperature in bin i	[K]
$u_{\alpha,i,j}$	combined standard uncertainty of site calibration in wind speed bin i and wind direction bin j	[m/s]
$u_{\rho,i}$	category B standard uncertainty of air density correction in bin i	[kg/m ³]
V	wind speed	[m/s]
V_{ave}	annual average wind speed at hub height	[m/s]
V_i	normalized and averaged wind speed in bin i	[m/s]
V_n	normalized wind speed	[m/s]
$V_{n,i,j}$	normalized wind speed of data set j in bin i	[m/s]
V_{10min}	measured wind speed averaged over 10 min	[m/s]

v	transversal wind speed component	[m/s]
$\bar{v}$	mean flow air speed	[m/s]
v_{eq}	measured equivalent wind speed	[m/s]
$v_{eq,final}$	final rotor equivalent wind speed	[m/s]
$v_{eq,MM}$	equivalent wind speed based on meteorological mast measurements	[m/s]
$v_{eq,RSD}$	equivalent wind speed based on remote sensing device measurements	[m/s]
v_h	hub height wind speed	[m/s]
$v_{h,MM}$	wind speed measured at hub height with meteorological mast	[m/s]
v_{hn}	hub height wind speed normalised for a specific wind shear profile	[m/s]
$v_{h,RSD}$	wind speed measured at hub height by the remote sensing device	[m/s]
v_i	wind speed measured at height i	[m/s]
v_{zi}	wind speed at height z_i	[m/s]
WME	wind measurement equipment	
w	vertical wind speed component	[m/s]
w_i	weighting function to define deviation envelope	
X_k	parameter averaged over pre-processing time period	
X_{10min}	parameter averaged over 10 min	
x	distance downstream from obstacle to wind measurement equipment or wind turbine	[m]
z	height above ground	[m]
z_i	height of the i^{th} wind turbine rotor segment	[m]
α	wind shear exponent from power law	[°]
$\mathcal{E}_{max,i}$	maximum deviation for any wind speed bin i in the wind speed range	[m/s]
θ	disturbed sector	[°]
κ	von Karman constant 0,4	
λ	speed ratio	
ρ	air density	[kg/m ³]
ρ_0	reference air density	[kg/m ³]
ρ_{10min}	derived air density averaged over 10 min	[kg/m ³]
$\sigma_{P,i}$	standard deviation of the normalized power data in bin i	[W]
σ_{10min}	standard deviation of parameter averaged over 10 min	
$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	standard deviations of longitudinal/transversal/vertical wind speeds	
Φ	relative humidity (range 0 % to 100 %)	
ω	angular speed	[s ⁻¹]

5 Power performance method overview

The wind shear and wind veer may vary significantly over the rotor height of large wind turbines for atmospheric stability conditions and it is also dependent on topography at the site. The occurrence of extreme atmospheric stability conditions is a site specific issue, and if occurring during a power performance test, the power curve may vary significantly.

The power performance measurement method used in this standard is based on a definition of the power curve that expresses power produced versus the wind speed that represents effectively the kinetic energy flux in the wind flowing across the swept area of the rotor.

The kinetic energy flux (referring to a certain point in time or period of time, typically 10 min, assuming that the wind speed does not change within this time¹) across the vertical capture area is in general terms expressed as:

$$P_{\text{kin}} = \int_A \frac{1}{2} \rho V^3 dA \quad (2)$$

Here the wind speed V , measured at a point in space over the rotor area, is the horizontal wind speed². The horizontal wind speed is defined as the average magnitude of the horizontal component of the instantaneous wind velocity vector, including only the longitudinal and lateral (but not the vertical) components. When we consider a horizontal axis wind turbine the wind veer is also taken into account and the kinetic energy in the wind is corrected according to the wind direction at hub height:

$$P_{\text{kin}} = \int_A \frac{1}{2} \rho (V \cos(\varphi - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA \quad (3)$$

Here φ_{hub} is the wind direction at hub height. The wind veer may vary significantly over the rotor height of large wind turbines for extreme atmospheric stability conditions and it is also dependent on topography at the site.

In this standard we do not consider wind shear and wind veer in the horizontal plane. Thus the energy equivalent wind speed that corresponds to the kinetic energy in the wind as derived from the expression of kinetic energy in Equation (3) in general is described as:

$$V_{\text{eq}} = \left(\frac{1}{A} \int_i (V_i \cos(\varphi_i - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA_i \right)^{1/3} \quad (4)$$

Here the index i refers to the height within the rotor area³.

Although horizontal wind speed is considered to be the influential wind speed parameter, on sites with significant non-horizontal flow (up or down-flow), there is additional uncertainty associated with both the measurement of the horizontal wind speed and the response of the wind turbine.

At sites with low and homogeneous wind shear and wind veer over the rotor (and for turbines with small rotor diameters in possibly more complex wind flow conditions), the wind speed measured at hub height can be a good representation of the kinetic energy to be captured by the rotor. Hub height wind speed is the wind speed upon which power curves have historically been defined in all previous editions of this standard. For that reason, the wind speed measured at hub height is the default definition of wind speed and shall always be measured and reported, even when more comprehensive measurements of wind speed are available over the rotor height.

¹ If the wind speed changes (i.e. if the turbulence intensity is >0) during a certain time period, then the kinetic power (averaged over this time period) is higher than in case of a constant wind speed, whereas a wind turbine has only a limited possibility to transform this additional kinetic power into additional electric power. This issue is not taken into further consideration here. As a simplification, the Equations (2), (3), (4) are considered valid here, even in case of a turbulence intensity >0. The impact of wind speed changes on the time averaged kinetic power and the associated impact on the wind turbine power curve is treated by the turbulence normalisation procedure as included in Annex M.

² Wind turbine power seems to correlate better with the horizontal wind speed definition than with a vector wind speed definition for a one point hub height wind speed measurement.

³ However when wind speed is mentioned in the document, it is by default referring to the hub height wind speed definition unless specifically stated to be this energy equivalent wind speed definition.

At sites and seasons where extreme atmospheric stability conditions are expected to be frequent, it is recommended always to measure wind shear.

If wind shear and wind veer are not measured over the full height of the rotor, there is added uncertainty in the equivalent wind speed. This uncertainty decreases as more wind speed and wind direction measurement heights are used. If measurements are limited to only hub height and there is no measurement of wind shear over the most significant parts of the rotor then this implies an uncertainty in determination of the equivalent wind speed.

For small wind turbines⁴, where the influence of the wind shear and wind veer are insignificant, the wind speed shall be represented by a hub height wind speed measurement alone without adding uncertainty due to lack of wind shear and wind veer measurements.

For vertical axis wind turbines, where the influence of the wind veer is not present, the wind veer shall be neglected.

As the wind conditions at the position of the test turbine and at the position of the wind measurement may differ significantly if the test turbine or the wind measurement is located in wakes of any wind turbines, such situations shall be excluded from the test.

The air density ρ also varies over the height of a large wind turbine rotor. However, this variation is small. For practical implementation of the power performance measurement method, it is sufficient to define and determine the air density only at hub height. The power curve is normalized to the average air density at the measurement site over the measurement period or to a pre-defined reference air density.

Power curves are also influenced by the turbulence at the test site, and turbulence may vary over the rotor. In this standard, only the site turbulence at hub height is considered. High turbulence increases the radius of curvature of the power curve at cut-in and at the start of power regulation at nominal power while low turbulence will make these corners of the power curve sharper. Site turbulence shall be measured and presented as a supplement to the power curve. If needed, a normalisation to a specified turbulence can be done using the method of Annex M.

In summary, the power curve according to this standard is a climate specific power curve, where:

- a) the wind speed at a point in space is defined as the horizontal wind speed;
- b) the wind speed of a power curve is defined as the hub height wind speed. This definition may be supplemented with the equivalent wind speed, as defined in Equation (4), taking account of vertical wind shear and wind veer⁵;
- c) air density is measured at hub height and the power curve is normalized to a site average air density during the measurement period or to a pre-defined reference air density;
- d) turbulence is measured at hub height and the power curve is presented without a turbulence normalization;
- e) the power curve can be normalized to a broader range of climatic conditions (e.g. specific air density, turbulence intensity, vertical shear and veer)⁶.

⁴ Small turbines, refer to IEC 61400-2.

⁵ For vertical axis wind turbines, the wind veer is omitted in Equation (3) (setting $\varphi_i = \varphi_{\text{hub}}$).

⁶ The power curve normalization is only valid for limited ranges of climatic conditions from the actual site conditions.

In this standard, all necessary procedures for measurements, calibration, classification, data correction, data normalization and determination of uncertainties are provided. However, if not all parameters are sufficiently measured, then uncertainty shall be applied due to the lack of measurement. This applies, for example, to the measurement of a power curve of a large wind turbine with only a hub height wind speed sensor. In this case, an uncertainty shall be applied for the variability of the wind shear and of the wind veer.

The best results from the use of the standard are achieved by measurement of all required parameters and use of all relevant procedures. However, if this is not possible, there are options both for the measurement setup and for the use of the procedures. These options are described in Table 1. The options refer to the use of wind measurement equipment, the applied normalizations, and additional uncertainties connected to the lack of measurements.

Table 1 – Overview of wind measurement configurations for power curve measurements that meet the requirements of this standard

Wind measurement configuration	1. Meteorology mast to hub height and remote sensing to all heights	2. Meteorology mast below hub height and remote sensing to all heights	3. Meteorology mast above hub height	4. Meteorology mast to hub height
Typical application	Large wind turbines ⁷ in flat terrain (see Annex B)	Large wind turbines in flat terrain (see Annex B)	Large and small wind turbines in all types of terrain	Large and small wind turbines in all types of terrain
Wind measurement sensors	7.2.3, 7.2.5	7.2.3, 7.2.5	7.2.3, 7.2.4	7.2.3
Normalisation procedures for climate specific power curve determination	Air density, wind shear; 9.1.5 and 9.1.3.4	Air density, wind shear; 9.1.5 and 9.1.3.4	Air density, wind shear; 9.1.5 and 9.1.3.4	Air density; 9.1.5
Additional uncertainty due to lack of wind shear measurement	No additional uncertainty dependent on measurement height coverage; E.11.2.2	No additional uncertainty dependent on measurement height coverage; E.11.2.2	No additional uncertainty dependent on measurement height coverage; E.11.2.2	Additional gross uncertainty for large wind turbines due to lack of vertical wind shear; E.11.2.2
Optional normalization procedures ⁸	Turbulence, wind veer and upflow angle; 9.1.6 and 9.1.4	Turbulence, wind veer and upflow angle; 9.1.6 and 9.1.4	Turbulence, wind veer and upflow angle; 9.1.6 and 9.1.4. Meteorological mast flow distortion; 9.1.2, Site calibration; Annex C.	Turbulence and upflow angle; 9.1.6. Site calibration; Annex C.

⁷ Refer to IEC 61400 -2 for definition of large and small wind turbines.

⁸ Upflow influences the power curve and can be measured with 3D sonic anemometers or upflow vanes. If an upflow angle normalization is applied then the method should be documented (uncertainty on upflow is considered in Annex E). However, no specific procedure is described in this standard on how to normalise for upflow angle.

6 Preparation for performance test

6.1 General

The specific test conditions related to the power performance measurement of the wind turbine shall be well-defined and documented in the test report, as detailed in Clause 10.

6.2 Wind turbine and electrical connection

As detailed in Clause 10, the wind turbine and electrical connection shall be described and documented to identify uniquely the specific machine configuration that is tested.

6.3 Test site

6.3.1 General

At the test site wind measurement equipment shall be set up in the neighbourhood of the wind turbine to determine the wind speed that drives the wind turbine.

Wind shear and atmospheric stability characteristics of the site may have significant influences on the wind measurement and the actual power performance of the wind turbine. Often there is a diurnal cycle of atmospheric stability, with stable atmosphere forming at night and neutral or unstable atmosphere during the day as the sun heats the ground, increasing turbulence and mixing in the boundary layer. Wind shear, wind veer, and turbulence are all a function of atmospheric stability and impact the relationship between the hub height wind speed to the rotor equivalent wind speed and unusual profiles may impact a wind turbine's energy conversion. In addition, flow distortion effects may cause the wind speed at the position of the wind speed measurement and wind turbine to be different, though correlated.

The test site shall be assessed for sources of wind flow distortion in order to:

- a) choose the position of the wind measurement equipment;
- b) define a suitable measurement sector;
- c) determine if a site calibration is required then determine the appropriate flow corrections by measurement according to Annex C;
- d) evaluate the uncertainty due to wind flow distortion.

The following factors shall be considered, in particular:

- 1) topographical variations and roughness;
- 2) other wind turbines;
- 3) obstacles (buildings, trees, etc.).

The test site shall be documented as detailed in Clause 10.

6.3.2 Location of the wind measurement equipment

Care shall be taken in locating the wind measurement equipment. The wind measurement equipment shall not be located too close to the wind turbine, since the wind speed will be influenced in front of the wind turbine. Also, it shall not be located too far from the wind turbine, since the correlation between wind speed and electric power output will be reduced. The wind speed measurement instrumentation shall be positioned at a distance from the wind turbine of between 2 and 4 times the rotor diameter D of the wind turbine. A distance of 2,5 times the rotor diameter D is recommended. In the case of a vertical axis wind turbine, refer to Clause H.4.

Prior to carrying out the power performance test and in helping to select the location for the wind measurement equipment, account should be taken of the need to exclude measurements

from all sectors in which either the wind measurement equipment or the wind turbine will be subject to flow disturbance.

In most cases, the best location for the wind measurement equipment will be upwind of the wind turbine in the direction from which most valid wind is expected to come during the test. In other cases, however, it may be more appropriate to place the wind measurement equipment alongside the wind turbine as the wind conditions will be more similar, for example for a wind turbine sited on a ridge.

6.3.3 Measurement sector

The measurement sector(s) shall exclude directions having significant obstacles and other wind turbines, as seen from both the wind turbine under test and the wind measurement equipment.

For all neighbouring wind turbines and significant obstacles, the directions to be excluded due to wake effects shall be determined using the procedure in Annex A. The disturbed sectors to be excluded due to the wind measuring equipment being in the wake of the wind turbine under test are shown in Figure 1 for distances of $2D$, $2,5D$ and $4D$. Reasons to reduce the measurement sector(s) might be special topographic conditions or unexpected measurement data from directions with complicated structures. All reasons for reducing the measurement sector shall be clearly documented.

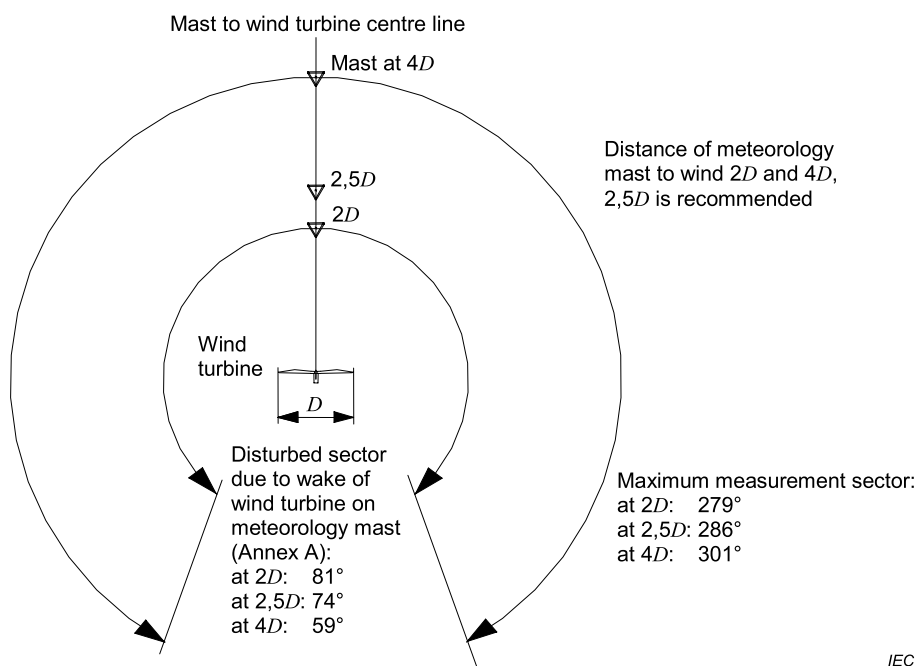


Figure 1 – Requirements as to distance of the wind measurement equipment and maximum allowed measurement sectors

6.3.4 Correction factors and uncertainty due to flow distortion originating from topography

The test site shall be assessed for sources of wind flow distortion due to topographical variations. The assessment in Annex B shall identify whether the power curve can be measured without a site calibration. If the criteria of Annex B are met, the wind flow regime of the site does not need a site calibration. However, in assuming that no flow correction is necessary, the applied uncertainty due to flow distortion of the test site shall be a minimum of 2 % of the measured wind speed if the wind measurement equipment is positioned at a distance between 2 and 3 times the rotor diameter of the wind turbine and 3 % or greater if

the distance is between 3 and 4 times the rotor diameter⁹, unless objective evidence can be provided quantifying a different uncertainty.

If the criteria of Annex B are not met, or a smaller uncertainty due to flow distortion of the test site is desired, then an experimental site calibration shall be undertaken in accordance with Annex C. The measured flow correction factors for each sector shall be used.

7 Test equipment

7.1 Electric power

The net electric power of the wind turbine shall be measured using a power measurement device (e.g. power transducer) and be based on measurements of current and voltage on each phase.

The class of the current transformers shall meet the requirements of IEC 61869-2 and the class of the voltage transformers, if used, shall meet the requirements of IEC 61869-3. They shall be of class 0,5 or better.

The accuracy of the power measurement device, if it is a power transducer, shall meet the requirements of IEC 60688 and shall be class 0,5 or better. If the power measurement device is not a power transducer then the accuracy should be equivalent to class 0,5 power transducers. The operating range of the power measurement device shall be set to measure all positive and negative instantaneous power peaks generated by the wind turbine. As a guide for MW-size active control regulated wind turbines, the full-scale range of the power measurement device should be set to –25 % to +125 % of the wind turbine rated power¹⁰. All data shall be periodically reviewed during the test to ensure that the range limits of the power measurement device have not been exceeded. The power transducer shall be calibrated to traceable standards. The power measurement device shall be mounted between the wind turbine and the electrical connection to ensure that only the net active electric power (i.e. reduced by self-consumption) is measured. It shall be stated whether the measurements are made on the wind turbine side or the network side of the transformer.

7.2 Wind speed

7.2.1 General

The wind speed measured at Hub Height only (HH) is the default wind speed definition and shall always be used. This may be considered the limiting case of the rotor equivalent wind speed where there is only one measurement height and additional uncertainty due to the lack of a wind shear or wind veer profile measurement (see E.11.2.2). It is recommended that the hub height wind speed measurement is supplemented with wind shear measurements in the lower half of the rotor to reduce the wind speed uncertainty. To further reduce the wind speed uncertainty, the Rotor Equivalent Wind Speed (REWS), see 9.1.3.2 and Annex Q, should be used as the wind speed input variable to the power curve.

The wind speed measurement configurations are summarized in Table 2 which takes account of the current limitations of each measurement technology with respect to the terrain complexity classification. Remote sensing devices that assume horizontal flow uniformity through the scanned volume limit the application of these technologies to non-complex terrain conditions for power performance testing. Thus only configurations based on Table 2 shall be applied.

⁹ These uncertainties were derived from a WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program, DTU Wind Energy) analysis of a Gaussian hill meeting the terrain requirements of Annex B.

¹⁰ In other cases, a higher range may be necessary. This has to be checked individually.

Table 2 – Wind speed measurement configurations (X indicates allowable configuration)

Wind speed measurement	HH	HH	REWS	REWS
Terrain type	Non-complex	Complex	Non-complex	Complex
Hub height meteorological mast	X	X		
Hub height meteorological mast + RSD	X	X	X	
RSD + non-hub height meteorological mast	X		X	
Meteorological mast covering heights above HH + 2/3 R	X	X	X	X

The different possible sensor configurations comprise meteorological mast top-mounted anemometers, meteorological mast side-mounted anemometers and remote sensing devices and these provide measurements of hub height wind speed, rotor equivalent wind speed and wind shear profile. Subclauses 7.2.3 to 7.2.5 describe the general, common requirements of top-mounted, side-mounted and remote sensing sensor configurations whilst 7.2.6 to 7.2.8 describe the application specific details for the measurements using these sensor configurations.

7.2.2 General requirements for meteorological mast mounted anemometers

The following requirements apply to all cup and sonic anemometer applications described in Subclauses 7.2.3 to 7.2.8.

The sensor shall meet the requirements in Annex I for cup and sonic anemometers. For power performance measurements an anemometer with a class better than 1,7A or 1,7C shall be used. Additionally, in terrain that requires a site calibration, it is recommended that a class better than class 2,5B, 2,5D or 1,7S shall be used, see Annex I and Annex J.

The anemometer shall be calibrated before and, if required, calibrated again after the measurement campaign (post-calibration). It is mandatory to check and document that the anemometer maintains the validity of its calibration throughout the measurement period. This can be achieved by either comparing the initial calibration results with the outcome of the post-calibration or as an alternative, the in-situ anemometer comparison following Annex K is permissible.

Where a post-calibration is carried out, the difference between the regression lines of calibration and post-calibration shall be within $\pm 0,1$ m/s in the range 4 m/s to 12 m/s. Only the calibration before the measurement campaign shall be used for the performance test. Calibration of the anemometer shall be made according to the procedure of Annex F. If the maximum difference between the regression lines of calibration and post-calibration is outside of $\pm 0,1$ m/s in the range of 4 m/s to 12 m/s, then the standard uncertainty of the anemometer calibration $u_{VS,precal,i}$ shall be increased (at least to this max. difference, but not to more than $\pm 0,2$ m/s). If the difference is above $\pm 0,2$ m/s, then the in-situ anemometer comparison of Annex K is to be used to identify the point in time when the deviation in the data occurred and the subsequent faulty data shall be rejected. If the in-situ test cannot determine the point at which the deviation began then the post-calibration difference is added as an uncertainty.

As an alternative, the in-situ calibration procedure of Annex K shall be used to check the anemometer integrity throughout the measurement period. In this procedure a control anemometer is used to monitor the primary anemometer. Where a cup anemometer is used as the primary anemometer, then either a cup anemometer or a sonic anemometer may be used as the control anemometer. Where a sonic anemometer is used as the primary anemometer, then the control anemometer shall be a cup anemometer. In the case where a REWS derived power curve is obtained from taller than hub height meteorological mast measurements, there shall be a side mounted primary anemometer at hub height on the mast with an associated control anemometer satisfying the mounting requirements from Annex G.

The uncertainty in wind speed measurement derives from several sources of uncertainty as specified in Table D.1 Uncertainty in calibration shall be derived from Annex F. Uncertainty due to operational characteristics shall be derived from Annex I on classification of anemometry. Uncertainty due to mounting effects shall be derived from Annex G.

7.2.3 Top-mounted anemometers

Where wind speed measurements are made with a top-mounted anemometer the requirements given in Annex G with respect to mounting shall be adhered to. The installed height of the sensor above ground level¹¹ shall be verified by measurement and the measurement method and its standard uncertainty documented¹². The standard uncertainty of the measurement of the height of the wind speed sensor above the estimated ground level shall be less than or equal to 0,2 m. The control anemometer shall be mounted according to the requirements of Annex G.

7.2.4 Side-mounted anemometers

The mounting shall follow the requirement for side mounted anemometers according to Annex G. The installed height of the side-mounted anemometers above ground level (see footnote 11) shall be verified by measurement and the measurement method and its uncertainty documented. The height measurement standard uncertainty shall be less than or equal to 0,2 m.

Correction of side-mounted anemometers for meteorological mast flow distortion is permitted and further described in 9.1.2 and Annex S. The technical basis for the correction and the effect of the correction shall be documented. The booms shall have identical orientations to ensure similarity of flow distortion between different heights. The meteorological mast and boom design should have similar flow distortion effect at the sensor with a maximum allowed difference in wind speed distortion of 1 % between all different heights. The meteorological mast cross-sectional dimensions should be consistent at each elevation, thus in the case of free-standing meteorological masts where the meteorological mast cross-sectional area is larger at the lower elevations, special care should be taken following the recommendations in Annex G. An alternative option is to mount a second anemometer at each measurement height on a separate boom and to limit the measurement sector such that the wind speed measurements do not deviate by more than 1 %.

7.2.5 Remote sensing device (RSD)

Remote sensing devices that assume horizontal flow uniformity through the scanned volume limit the application of these technologies to non-complex terrain conditions for power performance testing as defined by Annex B. The remote sensing device shall be verified before the measurement campaign or in-situ according to Clause L.3. The remote sensing device can be used to measure hub height wind speed, wind shear profile, wind veer and/or the rotor equivalent wind speed based on measurements at more than one height (see 7.2.8). In any case, the remote sensing device shall be simultaneously compared with a top-mounted anemometer on a meteorological mast at a height not less than the minimum of the wind turbine rotor lower tip-height or 40 m as defined in Clause L.1. Requirements on the top-mounted anemometer are identical to those described in 7.2.3.

The uncertainty of the RSD wind speed measurements shall be derived according to Annex L.

¹¹ For the purpose of defining ground level, an estimate of the mean elevation over a radius of 2 m around the mast base or 5 m radius around the turbine base can be made. The sensor height measurement uncertainty should exclude the uncertainty of the ground level estimate. For offshore conditions, ground level should be considered as mean sea level.

¹² The measurement can be performed by means of measurement device with a traceable calibration for example a theodolite able to derive heights from an angle measurement in the vertical plane.

7.2.6 Rotor equivalent wind speed measurement

If the wind speed is measured at three or more heights across the wind turbine rotor as defined in 7.2.8, then the rotor equivalent wind speed can be calculated according to 9.1.3. Note that more than three measurement heights are recommended. There are three options for measuring the rotor equivalent wind speed as described below.

- a) Where a hub height top-mounted anemometer satisfying the requirements of 7.2.3 is used together with an RSD satisfying the requirements of 7.2.5 and the terrain meets the requirements of Annex B then the measurements from the hub height anemometer and RSD are combined to determine the rotor equivalent wind speed according to 9.1.3.
- b) Where an anemometer not at hub height but otherwise satisfying the requirements for top-mounted anemometers of 7.2.3 is used with an RSD satisfying the requirements of 7.2.5 and the terrain meets the requirements of Annex B then the RSD measurements are used directly to determine the rotor equivalent wind speed according to 9.1.3.
- c) Where a taller than hub height meteorological mast is used with side-mounted measurements distributed across the rotor height, including an anemometer at hub height, then the side-mounted anemometer wind speed measurements may be used directly to measure the rotor equivalent wind speed according to 9.1.3.

7.2.7 Hub height wind speed measurement

There are three options for measuring hub height wind speed as described below.

- a) Where a hub height meteorological mast is used, the hub height wind speed measurements shall meet the requirements described in 7.2.3.
- b) If the terrain meets the requirements of Annex B, then the hub height wind speed can be measured with an RSD meeting the requirements of 7.2.5 and noting specifically the requirement to compare the RSD against a simultaneous top-mounted anemometer.
- c) A meteorological mast that is taller than the hub height may be used to better capture the wind speeds across the rotor area. In this case, the hub height wind speed shall be measured with a side-mounted sensor on a boom following the requirements described in 7.2.4.

For the hub height definition of wind speed, the lack of knowledge of the vertical wind shear or wind veer across the wind turbine rotor shall be accounted for by adding an uncertainty term according to Annex E based on the estimated or measured wind shear or wind veer. Where only a hub height wind speed measurement is available, an estimated wind shear or wind veer based on site characteristics (e.g. roughness) or prior measurement or modelling at the site (e.g. during a resource assessment campaign) shall be used as input to the uncertainty analysis. Where the hub height wind speed is determined using an RSD or taller than hub height meteorological mast with side-mounted wind speed measurements across the rotor or where below hub height side-mounted instruments are present and satisfying the minimum requirements described in 7.2.8, then wind shear or wind veer derived from the RSD or side-mounted instruments shall be used as input to the uncertainty assessment.

7.2.8 Wind shear measurements

Where wind speed measurements are available over a range of heights wind shear shall be measured and used for the rotor equivalent wind speed or for wind shear exponent determination.

Wind shear measurements shall either be performed using side-mounted anemometers as described in 7.2.4 or by a single remote sensing instrument as described in 7.2.5. Further specifications on wind shear measurement using remote sensing instruments or meteorological mast measurements are given in Annex L and Annex G respectively.

The rotor equivalent wind speed measurement shall include wind speed measurements above hub height. To apply a measurement-based wind shear correction, there shall be at least three wind speed measurements distributed over the rotor swept area. However, to minimise

wind speed uncertainty, it is recommended to have as many measurement heights as possible. Measurement heights should be distributed symmetrically around hub height and evenly over the vertical range of the rotor swept area.

The measurement heights shall include the following heights as a minimum:

- a) hub height $\pm 1,0\%$;
- b) between $H - R$ and $H - 2/3R$;
- c) between $H + 2/3R$ and $H + R$,

where H is the hub height of the wind turbine and R the radius of the rotor swept area, see Figure 2.

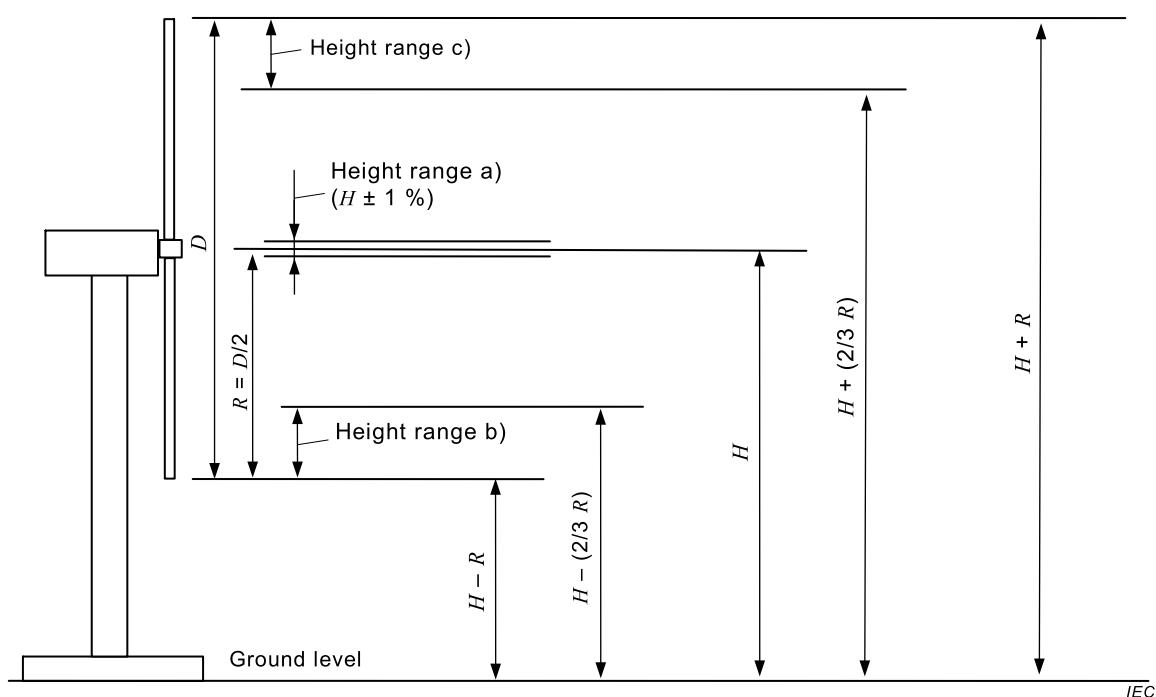


Figure 2 – Wind shear measurement heights appropriate to measurement of rotor equivalent wind speed

If the meteorological mast is hub height or a little above, then no wind speed measurements above hub height may be available for wind shear measurement. In that case, the measurements used to derive wind shear shall include at least the following heights:

- a) a side-mounted anemometer as close to hub height satisfying the requirements of Annex G for separation from the top-mounted anemometer,
- b) between $H - R$ and $H - 2/3R$ and satisfying the requirements of Annex G for side mounted anemometers.

where H is the hub height of the wind turbine and R the radius of the rotor swept area, see Figure 3.

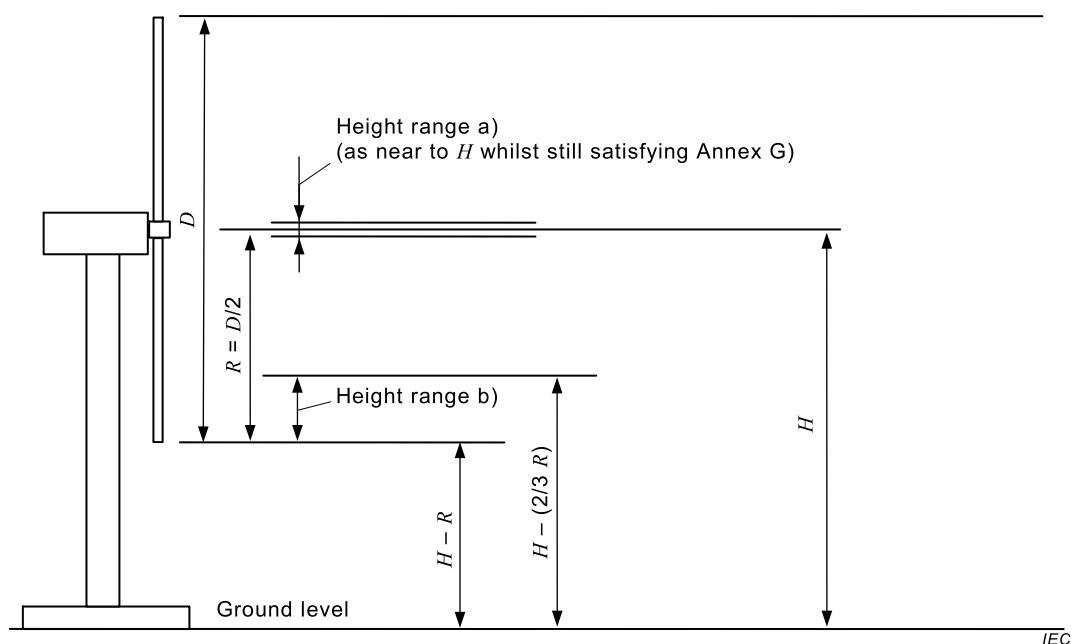


Figure 3 – Wind shear measurement heights when no wind speed measurements above hub height are available (for wind shear exponent determination only)

7.3 Wind direction

Wind direction measurements are used as an input to the site calibration, for filtering data to the valid direction sector and for determining wind veer. Wind direction shall be measured with a wind direction sensor. This may be a wind vane or a 2D or 3D sonic anemometer or an RSD. Where a sonic anemometer is used it shall be used in conjunction with a conventional wind vane as a control. If an RSD is used, it should be subjected to a verification test on the wind direction according to Annex L.

The instantaneous horizontal wind direction shall be determined and averaged over 10 min. Vector averaging (averaging of cosine and sine components of instantaneous wind direction values taking arc tan of the average values and adjusted to the 0° to 360° scale) is one method for deriving the average wind direction. Another method is to extend the wind direction scale for values above 360° and calculating the 10 min average, then adjusting the average value to the 0° to 360° range. Data measured within the dead band of a wind vane, usually at the north mark of the wind direction sensor body, are usually not defined (open circuit or short circuit) and shall be excluded. The combined calibration, operation, and orientation standard uncertainty of the wind direction measurement shall be less than 5° . The wind direction sensor shall be calibrated. Annex N provides guidance.

7.4 Air density

Air density shall be derived from measurement of air temperature, air pressure and relative humidity. As an alternative to the humidity measurement, an assumed value of 50 % relative humidity may be used if humidity is not measured. The air density shall be calculated using Equation (12) in 9.1.5.

The air temperature sensor shall be mounted within 10 m of hub height to represent the air temperature at the wind turbine rotor centreline. Refer to Annex G for temperature sensor mounting requirements where a meteorological mast shorter than hub height is used.

The air pressure sensor should be mounted within 10 m of hub height to represent the barometric pressure at the wind turbine rotor centreline. Air pressure measurements shall be always corrected to the appropriate hub height according to ISO 2533.

The humidity sensor should be mounted within 10 m of hub height to represent the humidity at the wind turbine rotor centreline.

7.5 Rotational speed and pitch angle

Rotational speed and pitch angle should be measured throughout the test if there is a specific need for it. For example if there is a need to apply the measurements in connection with acoustic noise tests. If measured, the measurements shall be reported according to Clause 10.

7.6 Blade condition

The condition of the blades may influence the power curve particularly for stall regulated wind turbines. It may be useful in understanding the characteristics of the wind turbine to monitor the factors that affect blade condition including precipitation, icing and bug and dirt accretion.

7.7 Wind turbine control system

Sufficient status signals shall be identified, verified and monitored to allow the rejection criteria of 8.4 to be applied. Obtaining these parameters from the wind turbine controller's data system is adequate¹³. The definition of each status signal shall be reported.

7.8 Data acquisition system

A digital data acquisition system having a sampling rate per channel of at least 1 Hz shall be used to collect measurements and store either sampled data or statistics of the data sets as described in 8.3.

The calibration and accuracy of the data system chain (transmission, signal conditioning and data recording) shall be verified by injecting known signals from a traceable, calibrated source at the transducer ends and comparing these inputs against the recorded readings. As a guideline, the uncertainty of the data acquisition system should be negligible compared with the uncertainty of the sensors.

8 Measurement procedure

8.1 General

The objective of the measurement procedure is to collect data that meet a set of clearly defined criteria to ensure that the data are of sufficient quantity and quality to determine the power performance characteristics of the wind turbine accurately. The measurement procedure shall be documented, as detailed in Clause 10, so that every procedural step and test condition can be reviewed and, if necessary, repeated.

Accuracy of the measurements shall be expressed in terms of standard uncertainty, as described in Annex D. During the measurement period, data should be periodically validated to ensure high quality. Test logs shall be maintained to document all important events during the power performance test.

8.2 Wind turbine operation

During the measurement period, the wind turbine shall be in normal operation, as prescribed in the wind turbine operations manual, and the machine configuration shall not be changed. The operational status of the wind turbine shall be reported as described in Clause 10. Normal maintenance of the wind turbine shall be carried out throughout the measurement

¹³ A status signal on generator cut-in is adequate to verify cut-out hysteresis control algorithm.

period, but such work shall be noted in the test log. Any special maintenance actions, such as frequent blade washing, which ensure good performance during the test shall in particular be noted. Such special maintenance actions should be avoided.

8.3 Data collection

Data shall be collected continuously at a sampling rate of 1 Hz or higher. Air temperature, air pressure and humidity and precipitation, if measured, may be sampled at a slower rate, but at least once per minute.

The data acquisition system shall store either sampled data or statistics of data sets as follows:

- a) mean value;
- b) standard deviation;
- c) maximum value;
- d) minimum value.

Selected data sets shall be based on 10-min periods derived from contiguous measured data. Data shall be collected until the requirements defined in 8.5 are satisfied.

8.4 Data rejection

To ensure only data obtained during normal operation of the wind turbine are used in the analysis, and to ensure data are not corrupted, data sets shall be excluded from the database under the following circumstances:

- a) external conditions other than wind speed are out of the operating range of the wind turbine;
- b) the wind turbine cannot operate because of a wind turbine fault condition;
- c) the wind turbine is manually shut down or in a test or maintenance operating mode;
- d) failure or degradation (e.g. due to icing) of measurement equipment;
- e) wind direction outside the measurement sector(s) as defined in 6.3.3;
- f) wind directions outside valid (complete) site calibration sectors;
- g) any special atmospheric condition filtered during the site calibration shall also be filtered during the power curve test.

Any other rejection criteria shall be clearly reported.

The effect on the power curve of a large hysteresis loop in the cut-out control algorithm may be considerable. This effect shall not be included in the power curve, and all data sets where the wind turbine has stopped generating power due to cut-out at high wind speed shall be excluded. If cut-out behaviour has been reached during the measurement period, the measurements may be presented in a special database that includes all data points in the database. The power curve shall capture the effect of hysteresis at the cut-in control algorithm, as well as the effect of parasitic losses below cut-in. Cut-out hysteresis affects the higher wind speed bins and neglecting it may therefore lead to overestimation of energy production especially for scenarios with higher annual average wind speeds.

Subsets of the database collected under special operational conditions (e.g. high blade roughness due to dust, salt, insects and ice or if grid conditions vary significantly) or atmospheric conditions (e.g. precipitation, wind shear) that occur during the measurement period may be selected as special databases.

8.5 Database

After data normalisation (see 9.1) the selected data sets shall be sorted using the “method of bins” procedure, see 9.2. The wind speed range shall be divided into 0,5 m/s contiguous bins centred on multiples of 0,5 m/s. The selected data sets shall at least cover a wind speed range extending from 1 m/s below cut-in to 1,5 times the wind speed at 85 % of the rated power of the wind turbine. Alternatively, the wind speed range shall extend from 1 m/s below cut-in to a wind speed at which “*AEP*-measured” is greater than or equal to 95 % of “*AEP*-extrapolated”, see 9.3, where “*AEP*-measured” and “*AEP*-extrapolated” are defined using the appropriate, consistent definitions of wind speed (i.e. the hub height wind speed derived power curve and wind speed distribution and, in the case where REWS is derived, by the REWS derived power curve and wind speed distribution). For active pitch controlled wind turbines, the power curve may also be considered complete when the rated power has been reached and the average power does not change by more than the larger of 0,5 % of the power or 5 kW for three consecutive wind speed bins and there is not a trend of increasing power across these three bin-averages. The report shall state which of the three wind speed range criteria has been used.

The database shall be considered complete when it has met the following criteria:

- a) each bin includes a minimum of 30 min of sampled data;
- b) the database includes a minimum of 180 h of sampled data.

Should a single incomplete bin be preventing completion of the test, then that bin value can be estimated by linear interpolation from the two adjacent complete bins.

The database shall be presented in the test report as detailed in Clause 10.

9 Derived results

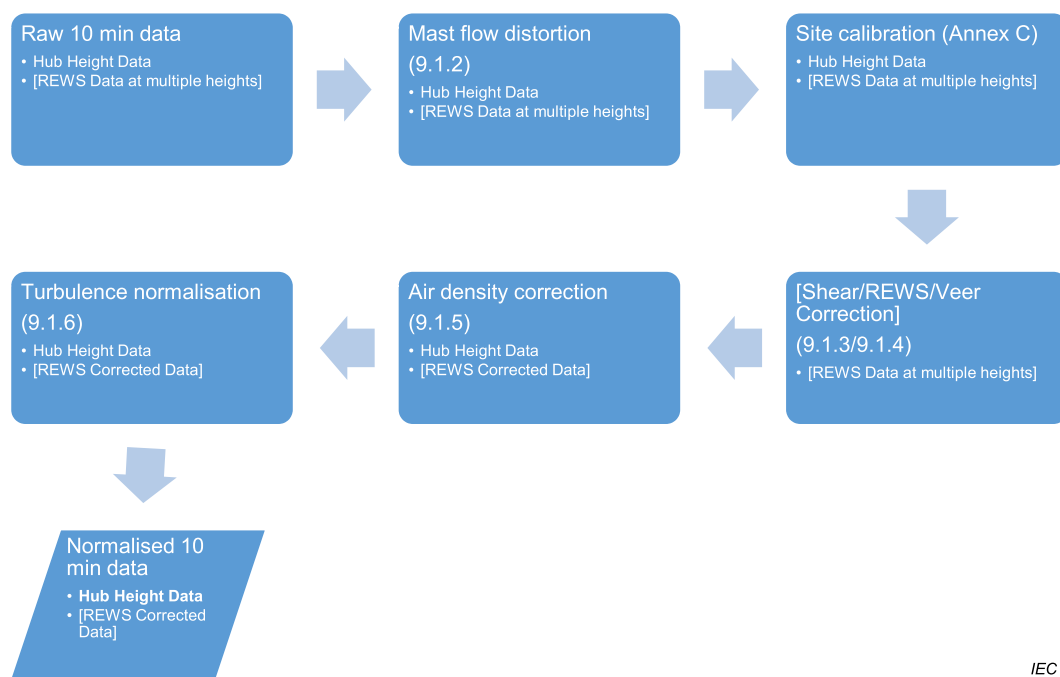
9.1 Data normalisation

9.1.1 General

In the following subclauses, three methods of normalisation are described for the main atmospheric drivers on the power curve results: air density, wind shear and turbulence intensity.

The purpose of these normalisations is to improve the accuracy of the results by means of concrete formulations for each variable. This will to some extent allow the comparison of results from different data sets bringing them to similar scale.

The various normalisations should be applied as indicated in the flow chart in Figure 4.



IEC

Figure 4 – Process of application of the various normalisations¹⁴

9.1.2 Correction for meteorological mast flow distortion of side-mounted anemometer

Correction of the wind speeds from side mounted anemometers for meteorological mast flow distortion is permitted (the requirement from Annex G for a maximum of 1 % meteorological mast flow distortion before application of the correction is still required). Any correction method shall be documented and reported following the requirements of 10.

The impact of the meteorological mast flow distortion on the wind shear measurement may be minimized by reducing the measurement sector where meteorological mast flow distortion is below a certain limit. The technical basis for any such reduction in sector width shall be documented. Annex S gives a possible method for determining the flow distortion correction for a lattice mast.

9.1.3 Wind shear correction (when REWS measurements available)

9.1.3.1 General

If the wind speed over the wind turbine rotor area is constant, the wind speed at hub height would be representative of the wind speed over the wind turbine rotor and the use of the hub height wind speed would be justified. However, the assumption of a point wind speed such as at hub height representing the wind speed over the wind turbine rotor area may not be representative for large wind turbines. It is therefore necessary to introduce corrections that account for the wind speed at hub height and the variations introduced by the wind shear over the wind turbine rotor. In the following, three quantities are defined:

- the rotor equivalent wind speed;
- the wind shear correction factor;

¹⁴ Where the optional REWS measurements are available, the REWS data follow a normalisation path parallel to the default hub height data normalisations as indicated by the terms in square brackets. The normalisation of the REWS data is carried out separately at each measurement height for all normalisation steps up to the step where the results from each height are combined into the wind shear/REWS/veer correction. A single REWS corrected value is derived for each 10-minute data point at each subsequent step in parallel to the corrections applied to each hub height data point.

c) the wind shear corrected wind speed.

The wind shear correction factor may be used to derive a climate specific power curve as explained in Annex P. However, this correction is based on the assumption that a wind turbine is able to convert all of the available kinetic energy.

9.1.3.2 Rotor equivalent wind speed

The rotor equivalent wind speed is the wind speed corresponding to the kinetic energy flux through the swept rotor area, when accounting for the vertical wind shear. Where the wind speed for at least three measurement heights are available (see 7.2.6), the rotor equivalent wind speed is defined as:

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^{n_h} v_i^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad (5)$$

where

n_h is the number of available measurement heights ($n_h \geq 3$);

v_i is the wind speed measured at height i ;

A is the complete area swept by the rotor (i.e. πR^2 with radius R);

A_i is the area of the i^{th} segment, i.e. the segment the wind speed v_i is representative for, derived from Equation (6).

The segments (with areas A_i) shall be chosen in the way that the horizontal separation line between two segments lies in the middle of two measurement points. The segment areas are then derived according to Equation (6):

$$A_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} c(z) dz = g(z_{i+1}) - g(z_i) \quad (6)$$

where

z_i is the height of the i^{th} segment separation line ($H-R < z_i < H+R$), numbered in the same order as v_i (either top down or bottom up).

The rotor width at height z is:

$$r(z) = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (z - H)^2} \quad (7)$$

where

R is the rotor radius;

H is the hub height.

The integrated function is:

$$g(z) = (z - H) \sqrt{R^2 - (z - H)^2} + R^2 \arctan \left(\frac{z - H}{\sqrt{R^2 - (z - H)^2}} \right) \quad (8)$$

Example of REWS calculation for one 10 minute wind speed profile

In this example, a wind turbine is assumed to have a hub height of 80 m and a rotor diameter of 100 m. The wind speed was measured at 5 heights with a meteorological mast. If the heights could have been chosen, ideally they would have been evenly distributed (40 m,

60 m, 80 m, 100 m and 120 m). This example shows a case where the heights were fixed independently from the REWS evaluation purpose. The segment limits were set in the middle of two consecutive measurements. The resulting REWS is equal to 9,38 m/s, see Table 3.

Table 3 – Example of REWS calculation

Measurement Heights [m]	Wind speed [m/s]	Segment weighting* [%]	Segment inferior limit height (z_i) [m]	Segment superior limit height (z_{i+1}) [m]	Segment height [m]
116	11,46	16,31	108	130	22
100	10,43	21,04	90	108	18
80	9,24	25,29	70	90	20
60	7,81	23,12	50	70	20
40	6,05	14,24	30	50	20
* Segment weighting is defined as the ratio between the segment area and the total swept rotor area.					

9.1.3.3 Wind shear correction factor

9.1.3.3.1 Case 1: Hub height meteorological mast with remote sensing device or remote sensing device with short (below hub height) meteorological mast

A wind shear correction factor measured using a remote sensing device is defined as the ratio of the rotor equivalent wind speed relative to the wind speed measured at hub height according to Equation (9):

$$f_{r,RSD} = v_{eq,RSD} / v_{h,RSD} \quad (9)$$

where

$v_{eq,RSD}$ is the rotor equivalent wind speed measured by the remote sensing device, as defined in Equation (5);

$v_{h,RSD}$ is the wind speed measured at hub height by the remote sensing device.

9.1.3.3.2 Case 2: Meteorological mast above hub height

A wind shear correction factor measured using a meteorological mast is defined as the ratio of the rotor equivalent wind speed to the wind speed measured at hub height according to Equation (10)¹⁵:

$$f_{r,MM} = v_{eq,MM} / v_{h,MM} \quad (10)$$

where

$v_{eq,MM}$ is the rotor equivalent wind speed measured by the anemometers on the meteorological mast, as defined in Equation (5);

$v_{h,MM}$ is the wind speed measured by the anemometer at hub height.

¹⁵ Note that $f_{r,MM}$ is for reporting purposes only.

9.1.3.4 Wind shear correction of wind speed

If the hub height wind speed and the wind shear are measured with the same type of WME, the rotor equivalent wind speed is calculated according to Equation (5).

If the hub height wind speed is measured using an anemometer mounted on a meteorological mast and the wind shear measurement with an RSD, the final rotor equivalent wind speed is calculated according to Equation (11):

$$v_{eq,final} = f_{r,RSD} v_{h,MM} \quad (11)$$

9.1.4 Wind veer correction

As explained in Annex Q, the change of wind direction over the rotor height range (wind veer) can have a significant impact on the wind turbine power output. In the case of large wind turbine rotors, it is recommended to apply the extended definition of equivalent wind speed including wind veer.

9.1.5 Air density normalisation

The air density shall be determined from measured air temperature, air pressure and relative humidity according to the Equation (12):

$$\rho_{10min} = \frac{1}{T_{10min}} \left(\frac{B_{10min}}{R_0} - \Phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (12)$$

where

ρ_{10min} is the derived 10 min averaged air density;

T_{10min} is the measured absolute air temperature averaged over 10 min [K];

B_{10min} is the air pressure corrected to hub height averaged over 10 min [Pa];

R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK];

Φ is the relative humidity (range 0 % to 100 %);

R_w is the gas constant of water vapour 461,5 [J/kgK];

P_w is the vapour pressure equal to $0,000\,020\,5 \exp(0,0631\,846\,T_{10min})$ [Pa];

Vapour pressure P_w depends on mean air temperature over the 10 min.

The selected data sets shall be normalised to at least one reference air density. The reference air density shall be the average of the measured air density of the valid collected data at the site during the test period (see 8.4), or alternatively a pre-defined nominal air density for the site. The average measured air density shall be rounded to the nearest $0,01 \text{ kg/m}^3$ and reported in accordance with 10.

For a stall-regulated wind turbine with constant pitch and constant rotational speed, data normalisation shall be applied to the measured power output according to Equation (13):

$$P_n = P_{10min} \left(\frac{\rho_0}{\rho_{10min}} \right) \quad (13)$$

where

P_n is the normalised power output;

P_{10min} is the measured power averaged over 10 min;

ρ_0 is the reference air density;

$\rho_{10\min}$ is the air density derived according to Equation (12) averaged over 10 min.

For a wind turbine with active power control, the normalisation shall be applied to the wind speed according to Equation (14):

$$V_n = V_{10\min} \left(\frac{\rho_{10\min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (14)$$

where

V_n is the normalised wind speed;

$V_{10\min}$ is the measured wind speed averaged over 10 min.

9.1.6 Turbulence normalisation

Wind turbine power curve measurements are influenced by the turbulence intensity. A significant part of the turbulence intensity effect is caused by the averaging of the measured power output and the measured wind speed over 10-minute periods. It is recommended to remove this effect from the measurements by normalising the power curve data to a reference turbulence intensity according to Annex M. The reference turbulence intensity shall be defined prior to the power curve test. It may be defined as a function of the wind speed at hub height. If not defined otherwise, a reference turbulence intensity of 10 % shall be applied. The uncertainty of the turbulence normalisation shall be accounted for. If no turbulence normalisation of the power curve data is performed, the uncertainty of the power curve due to turbulence effects shall be estimated. As a recommendation use the uncertainty method described in Annex M¹⁶.

9.2 Determination of the measured power curve

The power curve shall be determined based on the hub height wind speed and, if measured, the rotor equivalent wind speed. However, it should be remembered that the uncertainty in a power curve derived from hub height measurements only is subject to higher uncertainty due to the lack of knowledge of other influential wind condition parameters. Therefore to account for the vertical wind shear, wind veer and turbulence intensity and to reduce power curve measurement uncertainty, it is recommended to consider the rotor equivalent wind speed as the representative wind speed and the turbulence normalised power output according to Annex M as the relevant power output. The derivation of power curves based on wind speed normalised for a specific wind shear profile (see Annex P) and the turbulence normalised power output are options that are recommended if a comparison between different power curves is wanted or if the power curves are applied for wind resource assessment.

To indicate single 10-min averages, a further index j should be added to the respective wind speeds.

The measured power curve is determined by applying the "method of bins" for the normalized data sets, using 0,5 m/s wind speed bins and by calculation of the mean values of the normalized wind speed and normalized power output for each wind speed bin according to Equations (15) and (16):

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (15)$$

¹⁶ It should be noted that turbulence intensity measured by cup anemometers, remote sensing devices and ultra sonic anemometers are measured differently. This should be considered when interpreting the results.

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (16)$$

where

- V_i is the normalized and averaged wind speed in bin i ;
- $V_{n,i,j}$ is the normalized wind speed of data set j in bin i ;
- P_i is the normalized and averaged power output in bin i ;
- $P_{n,i,j}$ is the normalized power output of data set j in bin i ;
- N_i is the number of 10 min data sets in bin i .

The measured power curve shall be presented as detailed in Clause 10 and where REWS power curves are measured, the hub height wind speed power curve shall also be presented.

9.3 Annual energy production (AEP)

The *AEP* shall be calculated in two ways, one designated “*AEP*-measured”, the other “*AEP*-extrapolated”. If the measured power curve does not include data up to cut-out wind speed, the power curve shall be extrapolated from the maximum complete measured wind speed up to cut-out wind speed.

Furthermore, *AEP* may be defined as generic *AEP* or site specific *AEP*. Generic *AEP* is estimated by applying the measured power curve to different reference wind speed frequency distributions. For a specific development, nominal site conditions specifying the wind climate of the site may be known. If so, a site specific *AEP* may, additionally, be reported and computed based on this site specific information.

It is emphasised that a power curve derived from hub height wind speed measurements shall only be combined with a wind speed frequency distribution based on the hub height wind speed definition to derive *AEP* whereas a power curve derived from REWS measurements shall only be combined with a REWS frequency distribution to derive *AEP*. The *AEP* derived from combining a REWS power curve with a hub height wind speed frequency distribution (and vice versa) is not a valid calculation. A Rayleigh distribution, which is identical to a Weibull distribution with a shape factor of 2, shall be used as the reference wind speed frequency distribution. *AEP* estimations shall be made for hub height annual average wind speeds of 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s, 10 m/s and 11 m/s according to Equation (17):

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (17)$$

where

- AEP* is the annual energy production;
- N_h is the number of hours in one year $\approx 8\,760$;
- N is the number of bins;
- V_i is the normalized and averaged wind speed in bin i ;
- P_i is the normalized and averaged power output in bin i .

$$F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right) \quad (18)$$

where

- $F(V)$ is the Rayleigh cumulative probability distribution function for wind speed;

V_{ave} is the annual average wind speed;
 V is the wind speed.

The summation is initiated by setting V_{i-1} equal to $V_i - 0,5$ m/s and P_{i-1} equal to 0,0 kW.

For a specific site, nominal site conditions specifying the wind climate of the site may be known. If so, a site specific *AEP* may, additionally, be reported and computed based on this site specific information. If the site specific wind distribution is known and is present in tabular form, the site-specific *AEP* may be calculated by first transforming the wind distribution to the corresponding cumulative distribution. The amount of hours up to each measured wind speed of the measured power curve will be derived by linear interpolation between two adjacent values of the cumulative distribution. The hours will be divided by the sum of hours in the table, which is typically the nominal number of hours within a calendar year. Finally the *AEP* will be calculated by using Equation (17). The tabular wind speed distribution shall use the same definition of wind speed (hub height or REWS) as the measured power curve otherwise a valid *AEP* cannot be derived.

If the site specific wind distribution is presented as a Weibull distribution with known shape and scale factors, then the *AEP* may be calculated with Equation (17) and substituting the cumulative Rayleigh distribution Equation (18) with the Weibull distribution Equation (19):

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{A_W}\right)^k} \quad (19)$$

where

$F(V)$ is now the Weibull cumulative probability distribution function for wind speed;
 V is the wind speed;
 A_W is the Weibull scale factor;
 k is the Weibull shape factor;

AEP-measured shall be obtained from the measured power curve by assuming zero power for all wind speeds above and below the range of the measured power curve and carrying out the summation according to Equation (17).

AEP -extrapolated shall be obtained from the measured power curve by assuming zero power for all wind speeds below the lowest wind speed in the measured power curve and constant power for wind between the highest wind speed in the measured power curve and the cut-out wind speed. The constant power used for the extrapolated *AEP* shall be the power value from the bin at the highest wind speed in the measured power curve.

AEP -measured and *AEP* -extrapolated shall be presented in the test report, as detailed in Clause 10. For all *AEP* calculations, the availability of the wind turbine shall be set to 100 %. For given annual average wind speeds, estimations of *AEP* -measured shall be labelled as "incomplete" when calculations show that the *AEP* -measured is less than 95 % of the *AEP* -extrapolated.

Estimations of measurement uncertainty in terms of standard uncertainty of the *AEP* according to Annex D, shall be reported for the *AEP* -measured for all the used wind speed distributions.

The uncertainties in *AEP*, described above, only deal with uncertainties originating from the power performance test and do not take into account uncertainties due to other important factors relating to actual energy production for a given installation.

9.4 Power coefficient

The power coefficient, C_P , of the wind turbine shall be added to the test results and presented as detailed in Clause 10. C_P shall be determined from the measured power curve according to Equation (20):

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (20)$$

where

- $C_{P,i}$ is the power coefficient in bin i ;
- V_i is the normalized and averaged wind speed in bin i (matching the defined wind speed as either rotor equivalent wind speed or hub height wind speed);
- P_i is the normalized and averaged power output in bin i ;
- A is the swept area of the wind turbine rotor;
- ρ_0 is the reference air density.

10 Reporting format

The test report shall contain the following information:

- a) Identification and description of the specific wind turbine configuration under test (see 6.2), including:
 - 1) wind turbine make, type, serial number, production year;
 - 2) rotor diameter and a description of the verification method used or reference to rotor diameter documentation;
 - 3) rotor speed or rotor speed range;
 - 4) rated power and rated wind speed;
 - 5) blade data: make, type, serial numbers, number of blades, fixed or variable pitch, and pitch angle(s);
 - 6) hub height and tower type;
 - 7) description of the control system (device and software version) and documentation of status signals being used for data reduction;
 - 8) description of grid conditions at the wind turbine, i.e. voltage, frequency and their tolerances, and a drawing indicating where the power transducer is connected, specifically in relation to an internal or external transformer and self-consumption of power;
- b) A description of the test site (see 6.3), including:
 - 1) photographs of all measurement sectors preferably taken from the wind turbine at hub height;
 - 2) a test site map showing the surrounding area covering a radial distance of at least 20 times the wind turbine rotor diameter and indicating the topography, location of the wind turbine, wind measurement equipment, significant obstacles, other wind turbines, and measurement sector;
 - 3) results of site assessment, i.e. the limits of the valid measurement sector(s);
 - 4) if site calibration is undertaken, the limits of the final measurement sector(s) shall also be reported, including the rationale for any changes from the results of the site assessment;
 - 5) a table of the coordinates and elevation of the test wind turbine, wind measurement equipment and any significant obstacles considered in the assessment of obstacles;

- c) A description of the test equipment (see Clause 7):
 - 1) identification of all sensors, wind measurement equipment and data acquisition system, including documentation of calibrations of sensors, wind measurement equipment, transmission lines, and data acquisition system;
 - 2) sketch of the arrangement of the meteorological mast showing dimensions of the mast and instrument mounting, to document compliance with Annex G;
 - 3) description of method to ensure the calibration of the wind measurement equipment was maintained over the duration of the measurement period and documentation of results that show that the calibration is maintained;
- d) A description of the measurement procedure (see Clause 8):
 - 1) documentation of the procedural steps, test conditions, sampling rate, averaging time, and measurement period including:
 - documentation of the calibrations, corrections or transfer functions applied by the data logger and/or by post-processing;
 - 2) a test log book that records all important events during the power performance test, including:
 - a listing of all maintenance activities that occurred during the test;
 - a listing of any special actions (such as blade washing) that were completed to ensure good performance;
 - 3) a complete list of all filter criteria used to produce the reported result, including:
 - the parameter, measurement or time period or combination of parameters being filtered on;
 - the range or logical criteria for the filter;
 - the justification for the filter;
 - the order that the filters were applied shall be reported with the number of points removed each iteration. Alternatively, the number of data points the filter would remove from the database by itself;
 - the starting number of datasets in the database and the final number of datasets after all filters have been applied;
- e) Presentation of measured data (see 8.3 to 8.5). Data from each selected data set shall be presented in both tabular and graphical formats, providing statistics of measured power output as a function of wind speed and of important meteorological parameters including (where REWS measurements are available, the measured data shall be presented separately for both the hub height data and the REWS data):
 - 1) scatter plots of mean, standard deviation, maximum, and minimum power output as a function of wind speed (plots shall include information on sample frequency). An example is shown in Figure 5;
 - 2) scatter plots of mean wind speed and turbulence intensity as a function of wind direction;
 - 3) scatter plots of the turbulence intensity as a function of wind speed, and the average turbulence intensity in each wind speed bin shall be presented;
 - 4) special databases consisting of data collected under special operational or atmospheric conditions should also be presented as described above;
 - 5) if measured, rotational speed and pitch angle shall be presented with a scatter plot including binned values versus wind speed and a table with the binned values;
 - 6) definition of status signals and plots of status signals during the measurement period;
 - 7) scatter plots of air density as a function of wind direction and wind speed including average per bin;
 - 8) scatter plot of the wind shear exponent vs. time of day and as function of wind speed. The wind shear exponent in the lower rotor half and in the upper rotor half shall be

- presented separately. In addition, the average values of both wind shear exponents per wind speed bin shall be represented;
- 9) the average wind shear exponent or equivalent representation of the site wind shear conditions during the test;
 - 10) wind shear correction factor according to 9.1.3.3, if applicable based on measurement set up (use Equation (9) or Equation (10) depending on measurement configuration);
 - 11) the average air density measured during the test;
- f) Presentation of measured power curve for the reference air density (see 9.1 and 9.2) for the hub height wind speed derived power curve and also the REWS derived power curve if measured:
- 1) the power curve shall be presented in a table similar to Table 4¹⁷. For each wind speed bin, the table shall list:
 - normalized and averaged wind speed;
 - normalized and averaged power output;
 - number of data sets;
 - calculated C_p value;
 - standard uncertainties of category A (see Annex D and Annex E);
 - standard uncertainties of category B (see Annex D and Annex E);
 - combined standard uncertainty (see Annex D and Annex E);
 - 2) the power curve shall be presented in a graph similar to Figure 6. The graph shall show the following as a function of normalized and averaged wind speed:
 - normalized and averaged power output;
 - combined standard uncertainty;
 - 3) the C_p curve shall be presented in a graph similar to Figure 7;
 - 4) both the graph and the table shall state the reference air density used for the normalisation;
 - 5) if cut-out wind speed has been reached during the measurement period, the power curve and C_p curve, or the parts of the curves influenced by the cut-out hysteresis, can be presented in a similar way to items 1), 2), 3) and 4).
- g) Presentation of measured power curves collected under special operational and atmospheric conditions:
- 1) power curves derived from subsets of the database for special operational or atmospheric conditions may also be reported. If this is the case, a power curve should be reported in the same way as for the reference air density but with the density derived from the average of the measured air density of the subsets of the database or alternatively using a pre-defined nominal air density for the site.
- h) Presentation of estimated annual energy production for the reference air density (see 9.3) for the hub height wind speed derived power curve and also the REWS derived power curve if measured:
- 1) a table similar to Table 5 for each annual average hub height wind speed shall include:
 - *AEP*-measured;
 - standard uncertainty of *AEP*-measured (see Annex D and Annex E);
 - *AEP*-extrapolated;
 - 2) the table shall also state:

¹⁷ In addition to presenting the measured power curve in a table according to f) 1), the measured power curve can be presented as bin-centre values. The recommended method is to use a cubic spline for interpolation between the bin-values in the table to represent the measured wind speed, power and power coefficient values at the bin centre.

- reference air density;
- cut-out wind speed;
- 3) if at any annual average wind speed *AEP*-measured is less than 95 % of *AEP*-extrapolated, the table shall also include the label “incomplete” in the column of values of *AEP*-measured;
- i) Presentation of measured power coefficient (see 9.4):
 - 1) measured power coefficient should be presented as a function of wind speed in a table and a graph in which the swept area of the rotor shall be indicated;
- j) Presentation of results of site calibration (see Annex C for reporting requirements):
 - 1) if a site calibration is undertaken, it shall be presented in the report as a table;
 - 2) the table shall for each wind direction bin present:
 - minimum and maximum wind direction limits;
 - the bin-averaged wind direction;
 - the characteristics of the wind speed correction;
 - number of hours of data;
 - combined standard uncertainty of the wind speed ratio for 6 m/s, 10 m/s and 14 m/s;
 - 3) the report shall furthermore include graphs and tables as required in Annex C;
- k) Uncertainty of measurement (see Annex D):
 - 1) uncertainty assumptions on all uncertainty components shall be provided;
- l) Deviations from the procedure:
 - 1) any deviations from the requirements of this standard shall be clearly documented in a separate clause. Each deviation shall be supported with the technical rationale and an estimate of its effect on test results.

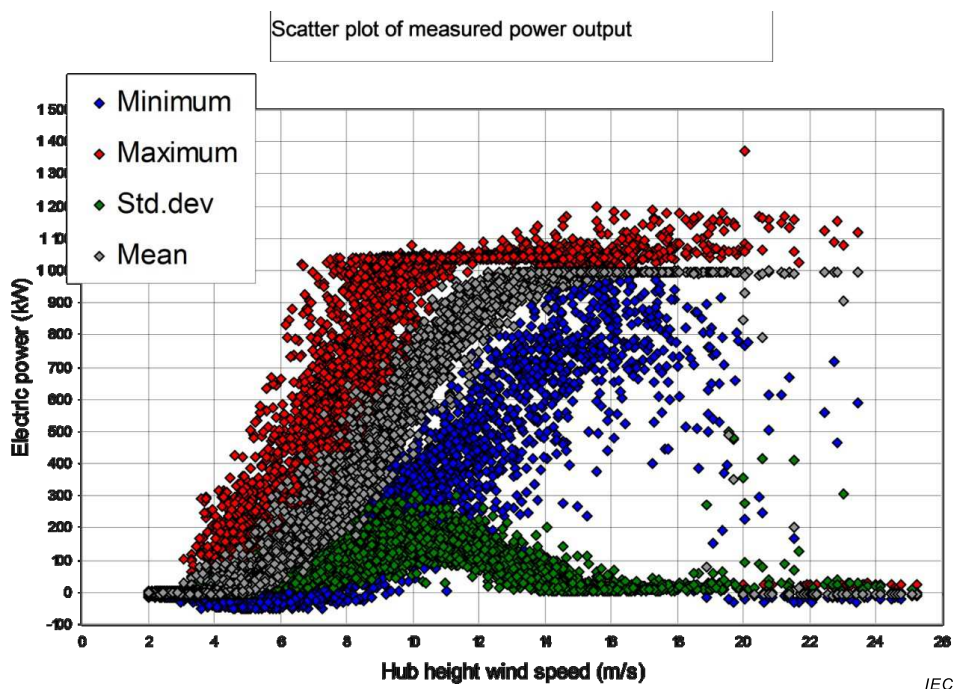


Figure 5 – Presentation of example database: power performance test scatter plot sampled at 1 Hz (mean values averaged over 10 min)

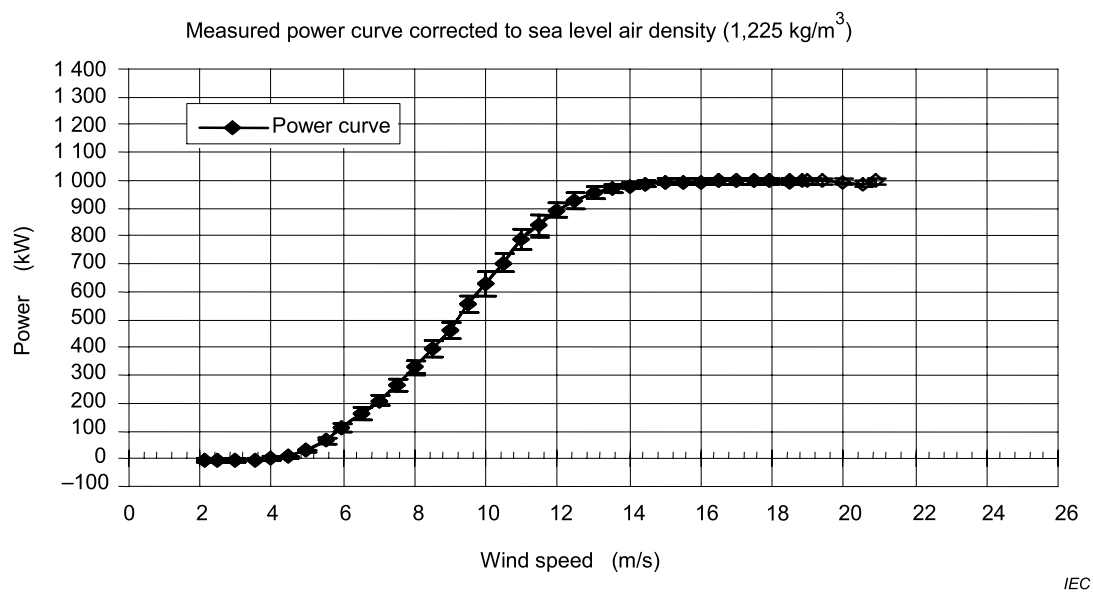
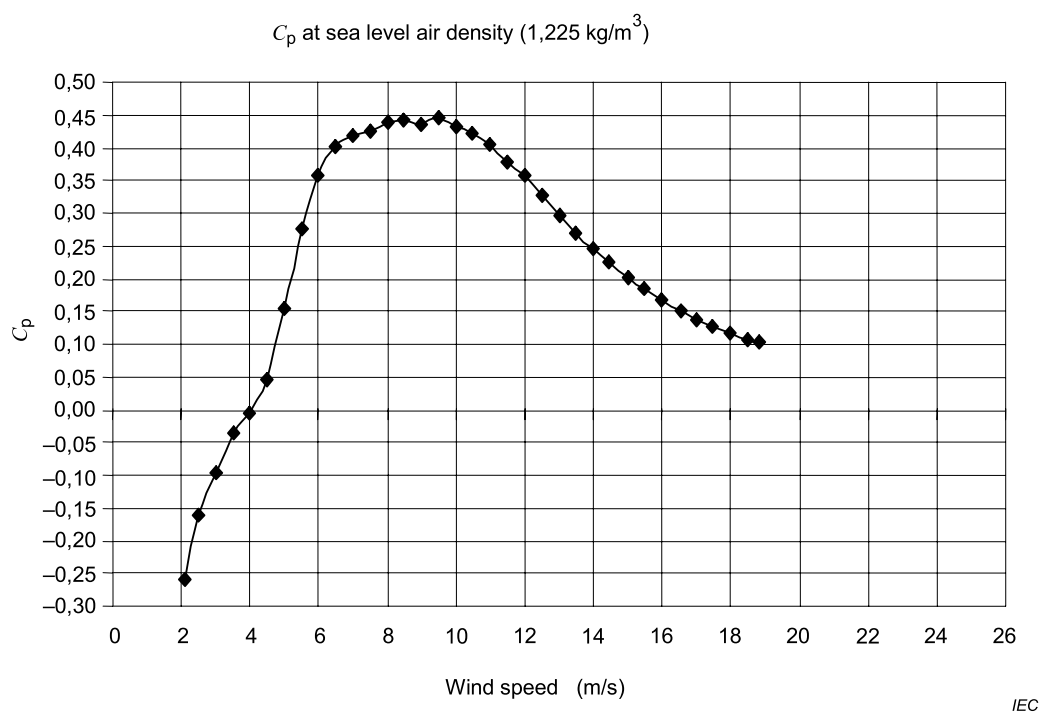
**Figure 6 – Presentation of example measured power curve****Figure 7 – Presentation of example C_p curve**

Table 4 – Example of presentation of a measured power curve

Measured power curve							
Reference air density: 1,225 kg/m ³					Category A	Category B	Combined uncertainty
Bin no.	Hub height wind speed [m/s]	Power output [kW]	C_P	No. of data sets (10 min. avg.)	Standard uncertainty s_i [kW]	Standard uncertainty u_i [kW]	Standard uncertainty u_{ci} [kW]
4	2,1	–3,6	–0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	–3,6	–0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	–3,8	–0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	–2,2	–0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	–0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	996,6	0,10	14	0,59	11,3	11,3
39	19,4	996,1	0,09	10	0,21	11,3	11,3

Measured power curve							
Reference air density: 1,225 kg/m ³					Category A	Category B	Combined uncertainty
Bin no.	Hub height wind speed [m/s]	Power output [kW]	C_P	No. of data sets (10 min. avg.)	Standard uncertainty s_i [kW]	Standard uncertainty u_i [kW]	Standard uncertainty u_{ci} [kW]
40	20,0	994,1	0,09	5	0,41	11,3	11,3
41	20,5	987,4 ¹⁸	0,08	2	2,67	11,4	11,7
42	20,9	996,9	0,08	3	3,38	11,8	12,3

Table 5 – Example of presentation of estimated annual energy production

Estimated annual energy production					
Reference air density: 1,225 kg/m ³					
Cut-out wind speed: 25 m/s					
(extrapolation by constant power from last bin)					
Hub height annual average wind speed (Rayleigh) m/s	<i>AEP</i> -measured (measured power curve) MWh	Standard uncertainty in <i>AEP</i> MWh	Standard uncertainty in <i>AEP</i> %	<i>AEP</i> -extrapolated (extrapolated power curve) MWh	
4	480	82	17	480	
5	1 081	113	10	1 081	
6	1 824	138	8	1 824	
7	2 595	155	6	2 603	
8	3 305	163	5	3 342	
9	3 889	165	4	3 995	
10	4 318	162	4	4 536	
11	4 592	157	3	4 954	Incomplete

NOTE The standard uncertainty figures in the above tables are based on a coverage factor of 1. This implies that the level of confidence (percentage of times in repeated power curve measurements the intervals will contain the “true” *AEP* value) is in the order of 58 % to 68 %. The level of confidence is only an estimate since detailed knowledge of the probability distribution of the measurand is normally not known. The upper value (68 %) applies to normal distributions and the lower value (58 %) applies to rectangular distributions.

¹⁸ The dataset in bin 41 is incomplete (less than three data sets), therefore, the power value in bin 41 for *AEP* calculation is interpolated as 995,7.

Annex A (normative)

Assessment of influences caused by wind turbines and obstacles at the test site

A.1 General

Annex A describes a procedure to determine one or more sectors which are not usable for the test because the flow at the wind turbine under test and/or the flow at the position of the wind measurement equipment (WME: a meteorological mast or a remote sensing device) might be affected by an operating wind turbine and/or by an obstacle.

The procedure consists of two steps, to be applied in the following order¹⁹:

- a) evaluation of influences caused by operating wind turbines (wind turbine under test, as well as neighbouring and operating wind turbines), as described in Clause A.2;
- b) evaluation of influences caused by obstacles, as described in Clause A.3 (under consideration of the special requirements for extended obstacles, as described in Clause A.5).

The valid sector which remains after this procedure shall be used for the terrain assessment according to Annex B.

The purpose of site calibration is generally to measure the change in the boundary layer as it follows the orography, which is generally attached flow, whereas obstacles often generate more turbulent wakes associated with them, which are affected by sharp edges and vertical surfaces that may trigger flow separation. A site calibration does not typically work well for correcting the effects of flow separation. This should be considered when deciding whether to treat an object as an obstacle or as terrain as flow separation and highly turbulent wakes are to be avoided. With this in mind, it is recommended that an object (including orographic elements which satisfy the dimensional criteria) whose height is more than half of its width be treated as an obstacle.

A.2 Requirements regarding neighbouring and operating wind turbines

The WME shall not be influenced by the wind turbine under test.

The wind turbine under test and the WME shall not be influenced by neighbouring operating wind turbines. If a neighbouring wind turbine is operated at any time during the power performance test, its wake shall be determined and accounted for as described in this annex (using the calculation given in Clause A.4). Small wind turbines of total height less than $(2/3)(H - D/2)$ shall be treated as obstacles, and accounted for as described in Clause A.3.

If a wind turbine is stopped at all times during the power performance test, it shall be considered as an obstacle and accounted for as described in Clause A.3.

The minimum distance from the wind turbine under test and the neighbouring and operating wind turbines shall be two rotor diameters D_n of the neighbouring wind turbine. The minimum distance from the WME to any neighbouring and operating wind turbine shall be two rotor diameters of the respective wind turbine. The sectors to exclude due to wakes from neighbouring and operating wind turbines shall be taken from Figure A.1. The dimensions to be taken into account are the actual distance L_n and the rotor diameter D_n of the neighbouring

¹⁹ Note that step b) requires the preliminary measurement sector, which is the result of step a).

and operating wind turbine. The sectors to be excluded shall be derived for both the wind turbine under test and the WME, and they shall be centred on the direction from the neighbouring and operating wind turbine to the wind measurement equipment or the wind turbine. An example is shown in Figure A.2.

A.3 Requirements regarding obstacles

Obstacles near the wind turbine under test or near the WME shall be evaluated. Each obstacle shall be evaluated either as part of the orography (as described in Annex B²⁰), or – alternatively – according to the procedure which is described here as follows.

No significant obstacles (e.g. buildings, trees, parked wind turbines) shall exist in the measurement sector within a reasonable distance from the wind turbine or from the WME. Only small buildings, connected to the wind turbine operation or the wind measurement equipment, are acceptable. Where significant obstacles are present then the measurement sector shall be reduced as described in Clause A.4 and A.5.

The criterion for the significance of an obstacle (with respect to the wind turbine under test and/or with respect to the WME) is to exceed one or more of the limits given in Table A.1, where Table A.1 shall be applied for all locations:

- a) for the evaluation of the surroundings of the wind turbine under test (i.e. using the centre of the wind turbine under test as centre of the $2L$, $4L$, $8L$, and $16L$ circles);
- b) for the evaluation of the surroundings of the WME (i.e. using the position(s) of the equipment as centre of the $2L$, $4L$, $8L$, and $16L$ circles)

Table A.1 – Obstacle requirements: relevance of obstacles

Distance ^a	Sector ^b	Maximum obstacle height from terrain surface ^c
$<2L$	360°	$<1/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ and $< 4L$	Preliminary measurement sector	$<2/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 4L$ and $<8L$	Preliminary measurement sector	$< (H - 0,5 D)$
$\geq 8L$ and $<16L$	Preliminary measurement sector	$<4/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ and $<16L$	Clearly outside preliminary measurement sector by 40° or more	No limit to height
^a from obstacle to wind turbine under test, respectively from obstacle to WME – whereas L is the horizontal distance between wind turbine under test and wind measurement equipment. ^b <i>Preliminary measurement sector</i> shall be understood here as the valid sector which remains after evaluation of neighbouring operating wind turbines (as described in Clause A.2, using the calculation described in Clause A.4), whereas all directions which are less than 40° outside shall also be considered. ^c H is the hub height and D is the rotor diameter of the wind turbine under test.		

A.4 Method for calculation of sectors to exclude

The wind turbine under test shall always be evaluated according to Figure A.1 with respect to its wake influence on the WME.

²⁰ The consideration of an obstacle in this way will typically increase mainly the terrain variation, whereas the effect on the slope might be very small (except for extended obstacles, e.g. forests).

A neighbouring and operating wind turbine shall always be evaluated according to Figure A.1 with respect to its wake influence on the wind turbine under test and also with respect to its wake influence on the WME.

With respect to operating wind turbines, the dimensions to be taken into account are the actual distance L_n (from centre of wind turbine under test to the position of the WME) and the rotor diameter D_n of the wind turbine that causes the wake²¹.

An obstacle shall be evaluated according to Figure A.1 with respect to its wake influence on the wind turbine under test if the obstacle is significant with respect to the wind turbine under test according to Table A.1.

An obstacle shall be evaluated according to Figure A.1 with respect to its wake influence on the WME if the obstacle is significant with respect to the WME according to Table A.1.

With respect to obstacles, the dimensions to be taken into account are the actual horizontal distance L_e (from the centre of wind turbine under test or from the position of the WME as appropriate) and an equivalent rotor diameter D_e of the obstacle. A stopped neighbouring wind turbine may be treated as a cylinder with a diameter equal to the tower base diameter and a height equal to the upper tip height. The equivalent rotor diameter of the obstacle shall be defined as:

$$D_e = \frac{2l_h l_w}{l_h + l_w} \quad (\text{A.1})$$

where

D_e is the equivalent rotor diameter;

l_h is the height of obstacle;

l_w is the width of obstacle as seen from the wind turbine under test or from the WME.

²¹ The influence of the turbine under test on the WME is evaluated by means of L (distance between turbine under test and wind measurement equipment) and D (rotor diameter of turbine under test).

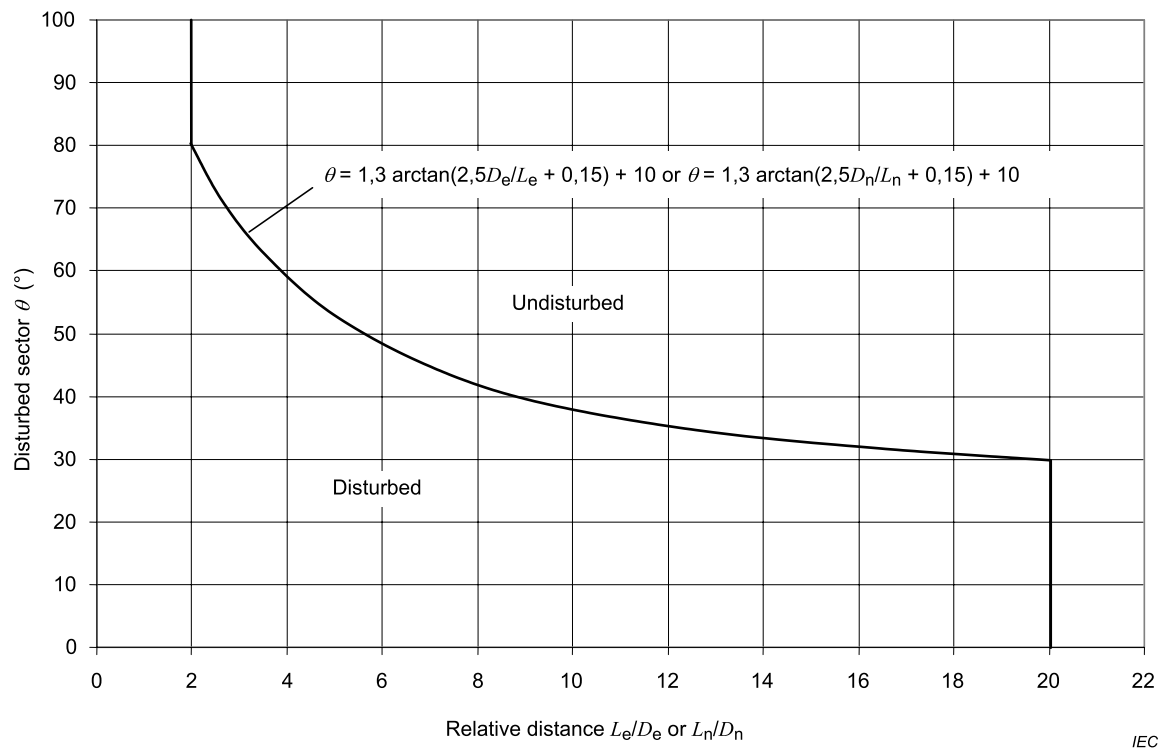
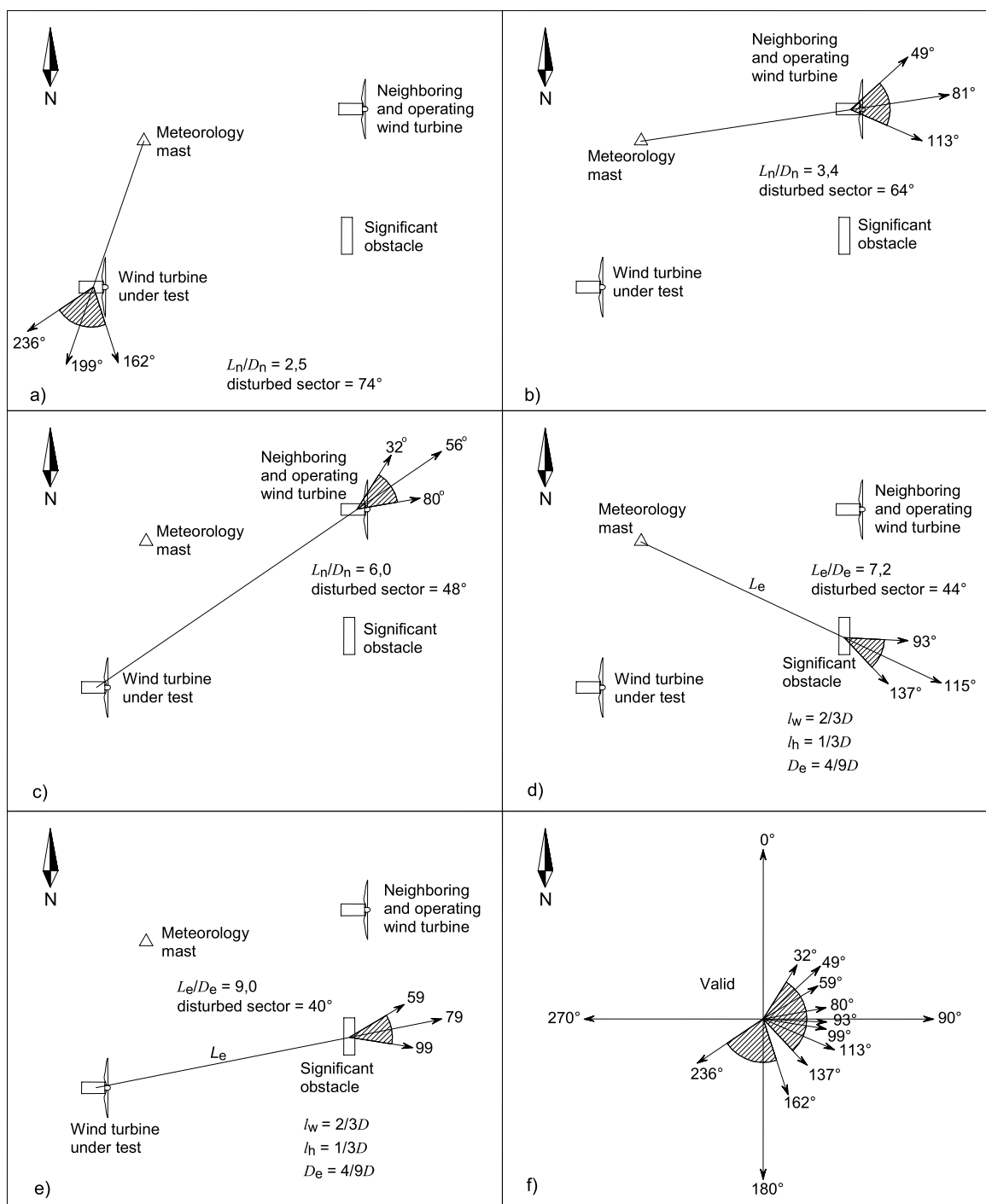


Figure A.1 – Sectors to exclude due to wakes of neighbouring and operating wind turbines and significant obstacles



IEC

Figure A.2 – An example of sectors to exclude due to wakes of the wind turbine under test, a neighbouring and operating wind turbine and a significant obstacle

The figures show the sectors to exclude if:

- the WME (meteorological mast or remote sensing device) is in the wake of the wind turbine under test;
- the WME is in the wake of the neighbouring and operating wind turbine;
- the wind turbine under test is in the wake of the neighbouring and operating wind turbine;
- the WME is in the wake of the significant obstacle;

- e) the wind turbine under test is in the wake of the significant obstacle;
- f) all of the above effects a) to e) are combined.

NOTE The example shown in Figure A.2 is based on the assumption that the obstacle is significant (according to Table A.1) with respect to the wind turbine under test and also significant with respect to the wind measurement equipment.

A.5 Special requirements for extended obstacles

Obstacles within a distance of less than $4L$ (from centre of the wind turbine under test or from the wind measurement equipment) which extend more than 50 m in any horizontal direction shall be divided into partial obstacles that do not extend more than 50 m in any horizontal direction and exactly 50 m in any dimension that is more than 50 m. These partial obstacles may overlap each other. The combination of these partial obstacles shall at least²² cover the original obstacle completely. Each partial obstacle shall be evaluated separately. The significance of each partial obstacle shall be assessed, and if it is found to be significant, the sector to be excluded shall be determined. For example:

- a) An obstacle 90 m by 90 m is divided into 4 partial obstacles 50 m by 50 m each. These partial obstacles are chosen such that they overlap each other by 10 m so that the set union of the 4 partial obstacles is identical to the original obstacle.
- b) An obstacle 70 m by 10 m is divided into 2 partial obstacles 50 m by 10 m each. These partial obstacles are chosen such that they overlap each other by 30 m so that the set union of the 2 partial obstacles is identical to the original obstacle.

A grouping of trees or forest shall be treated in this way.

²² For practical purposes, it makes sense to create partial obstacles which all have the same shape (e.g. squares of 50 m x 50 m). This is a conservative approach and therefore permitted. (In this case, the set union of all partial obstacles covers a larger area than the original obstacle.)

Annex B (normative)

Assessment of terrain at the test site

For testing without a site calibration (in terrain which is defined as “flat terrain”), the following criteria shall be kept (see Figure B.1 and Table B.1 for details):

- orography at the test site may only show minor variations from a plane, which passes both through the base of the tower of the wind turbine, and the terrain within the respective sector;
- each of these planes shall not exceed a certain limit for the slope.

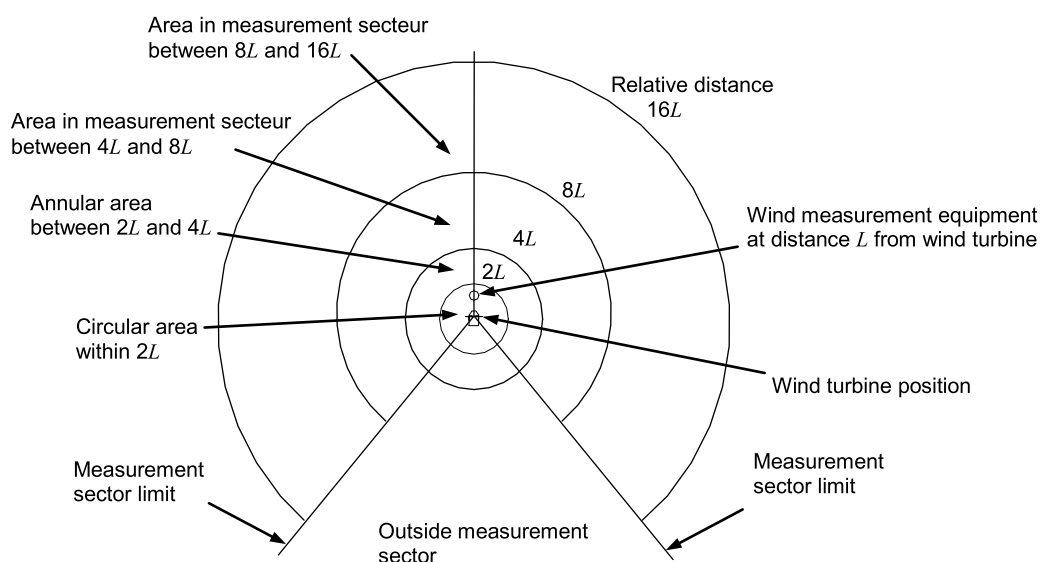
The assessment of the terrain shall be made using a digital model of the terrain with a grid resolution of 30 m or finer.

Table B.1 shall be applied for the locations below for the measurement sector:

- a) for the evaluation of the surrounding of the wind turbine under test (i.e. using the centre of the wind turbine under test as centre of the $2L$, $4L$, $8L$, and $16L$ circles);
- b) for the evaluation of the surrounding of the WME (i.e. using the position of the equipment as centre of the $2L$, $4L$, $8L$, and $16L$ circles).

If the terrain complies with all of the requirements of Table B.1 in both cases, then no site calibration is required²³ due to orography. Otherwise the terrain is defined as “complex terrain” and a site calibration measurement is required.

In Table B.1, L is the distance between the wind turbine and the WME, H is the hub height and D is the rotor diameter (of the wind turbine under test).



IEC

Figure B.1 – Illustration of area to be assessed, top view

²³ Nevertheless, other aspects of the terrain such as roughness, distance to the sea coast, or other considerations, may lead to the conclusion that a site calibration is recommended.

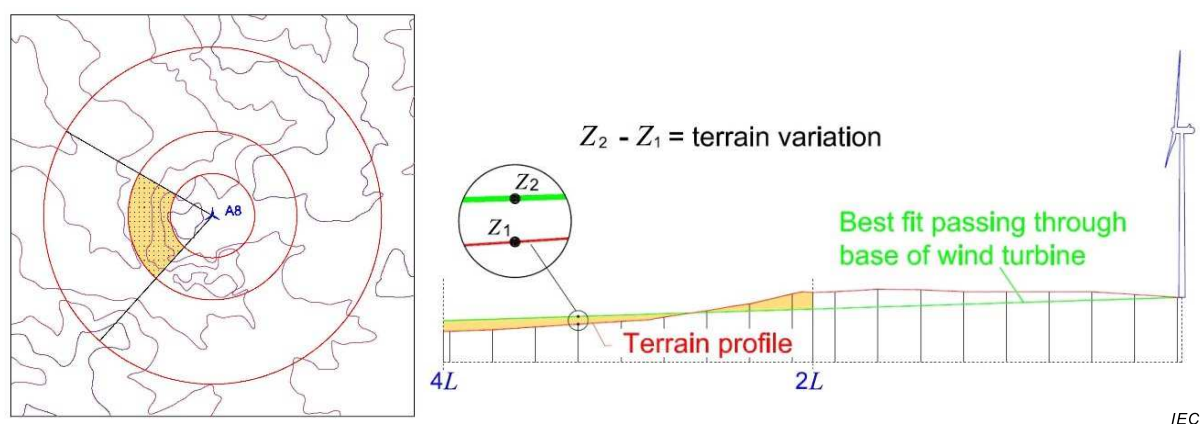
Table B.1 – Test site requirements: topographical variations

Distance	Sector ^a	Maximum slope %	Maximum terrain variation from plane
$<2L$	360°	$<3^b$	$<1/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ and $< 4L$	Measurement sector	$<5^b$	$<2/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ and $<4L$	Outside measurement sector	$<10^c$	Not applicable
$\geq 4L$ and $<8L$	Measurement sector	$<10^b$	$< (H - 0,5 D)$
$\geq 8L$ and $<16L$	Measurement sector	$<10^c$	Not applicable

^a Measurement sector is understood here by default as the remaining valid sector after execution of the procedure defined in Annex A, whereas it is also allowed to use a smaller measurement sector²⁴.

^b The maximum slope of the plane, which provides the best fit to the terrain in the sector being considered and passes through the tower base. See Figure B.2 for an example.

^c The line of steepest slope that connects the tower base to individual terrain points on the surface of the terrain within the sector. See Figure B.3 for an example.

**Figure B.2 – Example of determination of slope and terrain variation from the best-fit plane: “2L to 4L” and the case “measurement sector” (Table B.1, line 2)**

NOTE 1 This figure shows just one direction. All directions within the measurement sector are considered for the calculation of the plane which provides the best fit, and then the maximum terrain variation against this plane is determined by analysing all directions as shown above.

²⁴ It is additionally recommended to check if significant terrain variation exists slightly outside the borders of this sector. If this is the case, the final sector which is considered for the power performance test should keep a clear directional distance to these critical directions.

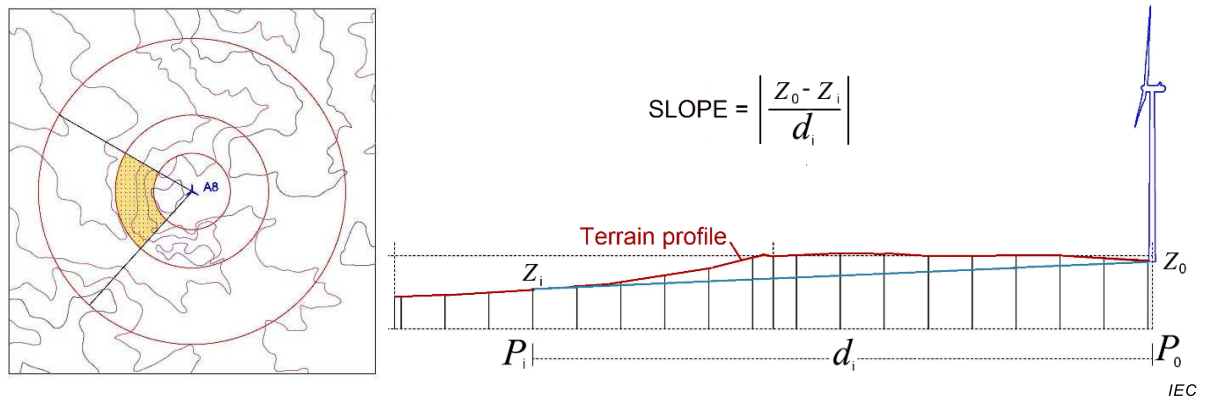


Figure B.3 – Determination of slope for the distance “2L to 4L” and “8L to 16L” and the case “outside measurement sector” (Table B.1, line 3 and line 5)

NOTE 2 This figure shows just one direction. All directions outside the measurement sector are analysed in the same way, and the worst-case result (i.e. highest slope) is considered.

Annex C (normative)

Site calibration procedure

C.1 General

A site calibration quantifies and potentially reduces the effects of terrain on the power performance measurement. Terrain may cause a systematic difference in wind speed between the position on the meteorological mast where the power performance anemometer is mounted and the equivalent height above ground at the centre of the turbine rotor at the turbine position. In addition, the relationship between the reference meteorological mast wind speed and the wind speed at the turbine position may also be affected by changes in atmospheric stability and/or the shear profile. Wind shear, which is the change in wind speed with height above the ground, may be also an influential parameter on this relationship as different shear profiles may cause a different relationship between the measurement points, especially if the turbine and met mast are at different elevations.

Seasonal considerations: atmospheric stability, turbulence and wind shear can be related to different seasonal conditions. There are also concerns of the effects of changes in roughness due to changes in the vegetation in the testing area or other roughness changes directly caused by different seasonal surface characteristics (water/land vs. ice/land, snow, crops, etc....). In light of these considerations, the site calibration and power curve measurement should be conducted during the same season or seasons. If the measurements are conducted in different seasons, additional uncertainty shall be applied as discussed in Clause C.7.

The outputs of the site calibration are:

- a) a table of flow corrections for all wind directions within the measurement sector(s) and
- b) an estimate of the standard uncertainty of these flow corrections.

There are two distinct methods in which the site calibration may be evaluated. Only one method is required, where the method is chosen by evaluating the data to assess shear as discussed in C.5.1. The output for each method is:

- 1) Subclause C.5.2 Site calibration with shear: the flow corrections consist of a matrix of wind direction bins and wind shear bins where a single wind speed ratio correction factor is calculated for each point in the matrix.
- 2) Subclause C.5.3 Site calibration where shear is not a significant influence: the flow corrections consist of a slope and an intercept value for each wind direction bin. The coefficient of determination, r^2 , value for the regression shall also be reported.

This procedure is given for the wind speed defined as the hub height wind speed. This is so that the procedure does not mandate upper tip height meteorological masts, which are expensive and may be impractical, as remote sensing devices may not be suitable for measurements in complex terrain. However, where a power curve is to be derived for the REWS definition of wind speed, then the procedure is repeated for each pair of measurement heights rather than just for the hub height on each meteorological mast.

C.2 Overview of the procedure

Prior to the installation of the wind turbine (or after the removal of it if already existing) two meteorological masts shall be erected. One meteorological mast is the reference position meteorological mast, which will also be used for the power performance test. The second meteorological mast is a wind turbine meteorological mast at the wind turbine position.

This procedure intends to characterize the correlation of the wind speeds between the two positions. Further recommendations for the selection of these positions are provided in C.3.1.

The flowchart in Figure C.1 provides a general overview of the preparation and analysis process.

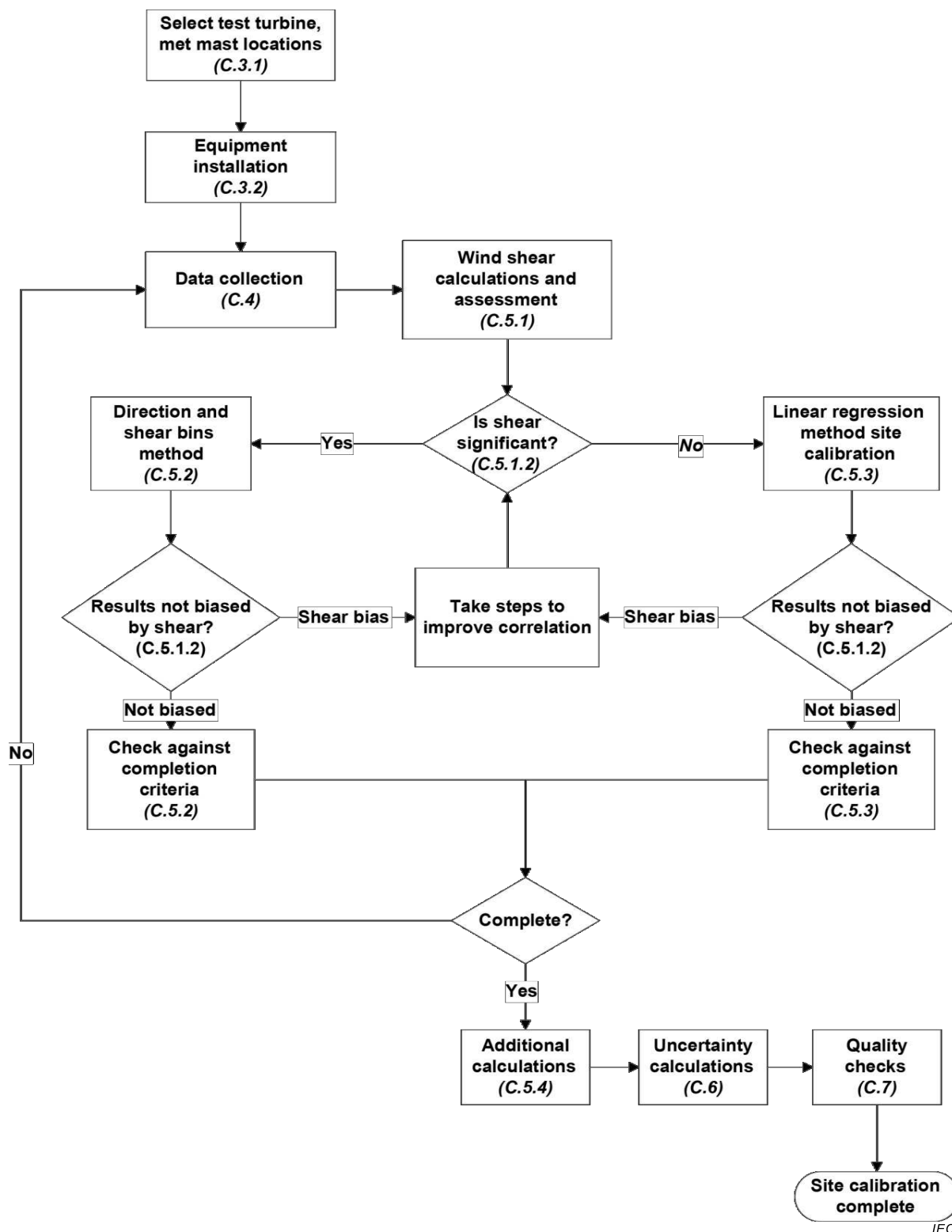


Figure C.1 – Site calibration flow chart

C.3 Test set-up

C.3.1 Considerations for selection of the test wind turbine and location of the meteorological mast

The reference meteorological mast shall be the same meteorological mast that is used for power curve measurement. The wind turbine meteorological mast shall be located as close as possible to the position where the test wind turbine will be or was located and shall be no more than $0,2 H$ from the centreline of the wind turbine where H is the wind turbine hub height. It is recommended that the wind turbine and reference meteorological masts be of the same type and have the same boom geometry so as to have similar mounting effects on the WME.

There are a number of factors that can affect site calibration. The most notable of these are terrain, meteorological mast location, and atmospheric conditions including wind shear, turbulence and stability. These factors can vary significantly from one location to another but are often correlated with each other.

The test wind turbine location should be selected to optimise valid data collection and provide a good correlation between the reference and wind turbine meteorological masts. The purpose of site calibration is to measure the change in the boundary layer as the wind follows the orography of the terrain, which is generally attached flow, whereas obstacles have more turbulent wakes associated with them, which are affected by sharp edges and vertical surfaces that may trigger flow separation. Additionally, certain terrain features such as cliffs or steep hills may also cause the flow to separate, resulting in a poor correlation. As a guide, the terrain type should be taken into consideration when selecting the test wind turbine and the reference meteorological mast location. The terrain types discussed here are informative, qualitative descriptions to aid selection of the test wind turbine and reference meteorological mast locations and to provide insight on what to expect when conducting measurements in these terrain types. Examples of these terrain types are illustrated in Figure C.2.

Type A:

Type A terrain is the least complex terrain type. A Type A site typically does not have significant changes in elevation relative to the hub height of the wind turbine or particularly steep slopes over long distances. Examples of Type A terrain include terrain that meets the requirements of Annex B, gentle rolling hills, and possibly wind turbines located on a ridge facing a plain.

When conducting site calibrations at Type A sites, the wind shear conditions at the reference meteorological mast may be different from the wind shear conditions at the wind turbine location. If this is the case, then the site calibration results will likely be dependent on wind shear and wind direction.

Type B:

Type B terrain is moderate to complex terrain. Type B terrain includes mountains, ridgelines, large hills, and hilly sites with moderate to steeply sloping terrain and significant changes in elevation relative to the hub height of the wind turbine. Typically the wind shear at Type B sites is low and relatively consistent, though at times negative wind shear may occur. Thus wind shear is not expected to be as significant a factor as for Type A sites. However, at Type B sites the site calibration results often depend on both wind speed and wind direction, especially if the difference in elevation between the reference meteorological mast and the test wind turbine is more than 10 m. Thus a linear regression correction is often appropriate for a Type B site.

The upflow/vertical wind speed component induced by the terrain at Type B sites can have a significant impact on the uncertainty, depending on the response of the anemometers to upflow. A vertical wind speed measurement may be used to assess the upflow angle, which

can then be used in conjunction with the anemometer classification report to calculate an S-type anemometer operational characteristic with user-defined influence parameter ranges as defined in Clause I.3.

Type C:

Type C terrain includes the most extreme terrain from a measurement perspective. Type C sites typically have a steep terrain feature such as a mountain or canyon that may cause flow separation directly upwind of the test wind turbine and create a recirculation zone at the test wind turbine location. The scale of the flow separation is defined by the terrain feature and may disrupt the wind speed correlation between the test wind turbine and reference meteorological mast even if the terrain feature is located farther than $16L$ away from the test wind turbine. Type C terrain is typically so complex that the correlation between the winds at the reference meteorological mast and the test wind turbine may be poor. The flow corrections may differ significantly between adjacent wind direction bins. Caution shall be taken when selecting test wind turbines at Type C terrain locations because the data will typically have very high scatter and high uncertainty in the result.

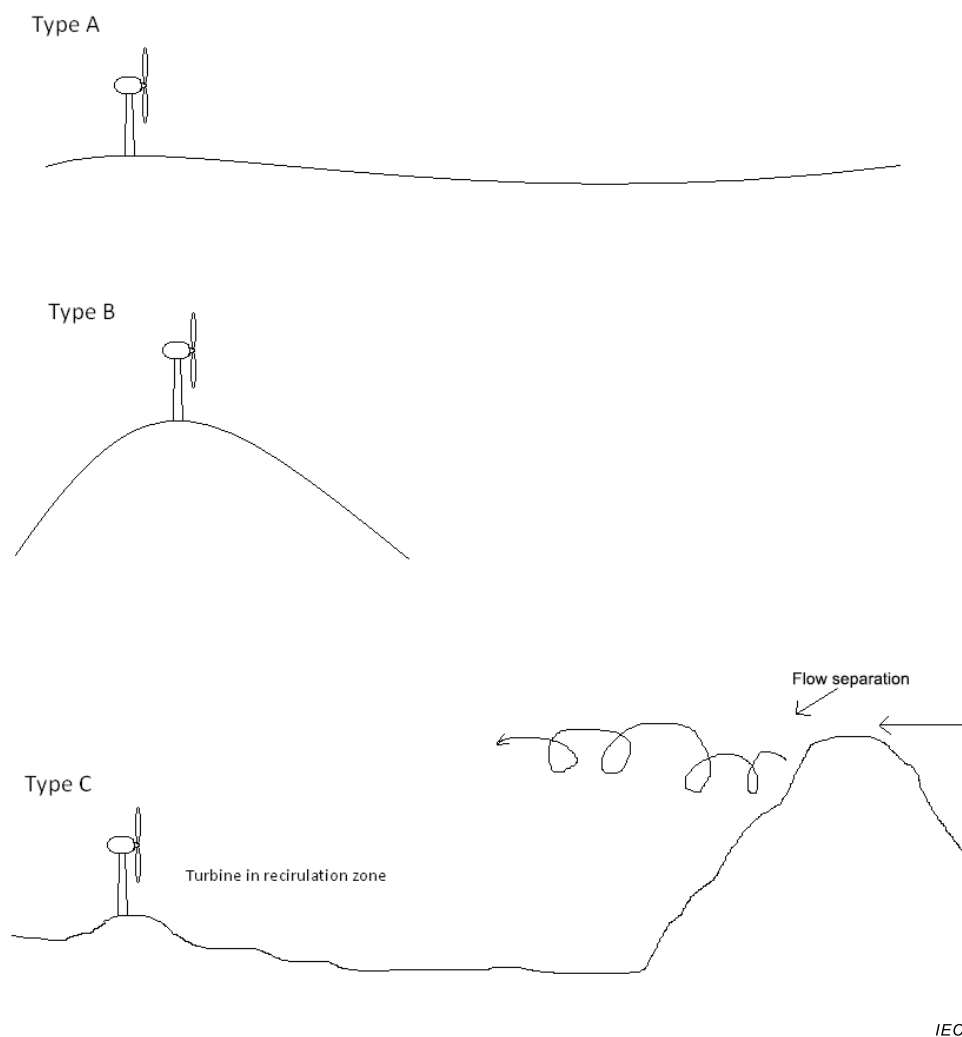


Figure C.2 – Terrain types

In order to improve the correlation, the reference meteorological mast should be located such that it has a similar elevation and wind conditions as those of the test wind turbine. For example, if the test wind turbine is located on a ridge, then the reference meteorological mast

is recommended to be located on the ridge next to the wind turbine instead of at a lower elevation in front of the wind turbine.

C.3.2 Instrumentation

The test set-up requires as a minimum measurements of hub height wind speed, wind direction near hub height, and wind shear at both meteorological masts according to 7.2.8.

WME used in the site calibration shall meet the requirements of 7.2 and follow the guidelines for mounting of Annex G. The anemometers shall be of the same type with the same operating characteristics and shall be calibrated in the same wind tunnel. The anemometers shall be of the same type with the same operating characteristics for the power curve measurement as for site calibration.

Depending on the site characteristics, additional measurements are recommended so as to provide more information about the site conditions and thus are not normative. These measurements may also be used to improve the overall quality of the site calibration and power curve measurement by identifying unusual atmospheric conditions that correlate with outliers or may be used to determine the right instrument classification and in conjunction with the relevant classification report quantify the site-specific anemometer operational characteristic standard uncertainty:

- a) A vertical wind speed measurement (e.g. using a 3D ultrasonic anemometer) is recommended within 10 % of hub height or within 5 m of hub height for smaller wind turbines so as not to violate the mounting requirements of Annex G for top mounted sensors. This measurement may be used to determine the correct class for the instrument classification and in conjunction with the instrument classification report to quantify the uncertainty due to operational characteristics in accordance with Annex I.
- b) A wind veer measurement is recommended with the lower wind direction measured within 10 m of the lower tip height wind speed measurement;
- c) If icing conditions are expected during the site calibration campaign, a temperature sensor or other means for icing detection is recommended near hub height.

Furthermore, to avoid the introduction of bias in the wind direction measurement due to uncertainty of the wind direction sensor installation, the reference meteorological mast and its wind direction sensor(s) should not be removed between the site calibration and the power curve measurement. If the primary wind direction sensor is removed or replaced, an additional uncertainty component shall be included (see C.7.4). If the reference meteorological mast is removed and re-installed between the site calibration and the power curve measurement, the instruments shall be mounted in the same configuration and with the same boom angles during both periods so as to have similar mounting effects.

C.4 Data acquisition and rejection criteria

Data shall be collected continuously at the same sampling rate as for the power performance test. Data sets shall be based on 10 min periods derived from contiguous measured data. The mean, standard deviation, minimum and maximum values for each 10 min period shall be derived and stored.

The wind direction bin size shall be 10°.

Data sets shall be rejected from the database under the following circumstances:

- a) failure or degradation (e.g. due to icing) of test equipment;
- b) wind direction outside the measurement sector(s) as defined in 6.3.3;
- c) mean wind speed at wind turbine meteorological mast less than 4 m/s or greater than 16 m/s;

- d) any other special atmospheric conditions that are found to influence the site calibration result and chosen to be rejection criteria;
- e) special atmospheric conditions to be used as rejection criteria during the power performance test that are found to influence the site calibration.

Any special atmospheric condition filtered during the site calibration shall also be filtered during the power curve test.

C.5 Analysis

The site calibration measures the relationship of wind speeds at two specific points in space. Orography represents a static influence on this relationship (the terrain is not moving over time) however wind shear adds a dynamic element to this relationship, as the wind speed gradient with height may vary significantly, or it may not if the site only sees a fairly steady shear over a limited range.

The first step in the site calibration process is therefore to assess the shear conditions at the site. The calculations and plots in C.5.1 are performed first to make this assessment, then based on the outcome either C.5.2 or C.5.3 is followed to complete the calculation of the flow corrections. Once the flow corrections have been calculated according to either C.5.2 or C.5.3, the procedure then continues with the additional calculations in C.5.4 which are inputs to the uncertainty calculations in Clause C.6 and the quality checks in Clause C.7.

C.5.1 Assessment of site shear conditions

C.5.1.1 Shear calculations and characterisation plots

For each 10 min data point, the following calculations shall be made:

- a) the wind speed ratio, which is the hub height wind speed at the turbine location divided by the hub height wind speed at the reference meteorological mast;
- b) the shear exponent at both met masts shall be calculated using the power law (see 3.31);
- c) the time of day using a 24 hour clock shall be determined from the timestamp and any offset to the site local time. Any adjustment to the local clocks for more daylight hours in summer vs. winter (i.e. Daylight Savings Time, summer time) shall be noted if it is applied to the data logger timestamps.

The analysis method shall depend on whether or not wind shear is determined to be a significant factor at the site. High shear, or more specifically a wide range of shear values, is typically due to a diurnal cycle of stable atmosphere at night and unstable atmosphere during the day. To illustrate the shear conditions at the site and to assist with the shear evaluation, the following scatter plots shall be generated for both the turbine location and reference met mast data from the filtered database:

- 1) scatter plot of wind shear exponent vs. time of day;
- 2) scatter plot of wind shear exponent vs. wind direction;
- 3) scatter plot of wind shear exponent vs. wind speed;
- 4) scatter plot of wind speed vs. time of day.

Please note that time of day should be used with care. What really lies behind this are the correlation to local sun-rise and sun-set times as these often strongly influence atmospheric stability. Especially for longer data sets and higher latitudes, the correlation between sun-rise, sun-set and time of day becomes quite poor.

For a site where these effects occur, typically the shear exponents observed during the day time will be low as the sun heats the ground causing turbulence and mixing of the layers and at night the shear will be high. Thus there may be a wide range of shear exponents and a noticeable change in the shear exponents from day time to night time for these sites.

C.5.1.2 Assess significance of shear

Regardless of atmospheric stability, shear shall be considered to be a significant factor if more than 25 % of the data points have a shear exponent greater than 0,25.

Shear shall be confirmed to be a significant parameter if the wind speed correlation improves following binning by direction and shear according to Method 1 in C.5.2; otherwise the site calibration may be evaluated following Method 2 – linear regression method described in C.5.3.

Dividing the measurement sector to allow for different methodologies for different sectors is permitted. This may be useful if, for example, the terrain from part of the measurement sector is Type A and from another direction it is Type B.

The goal is to ensure that the site calibration is not biased by unusual shear conditions; either the site calibration method accounts for the impact of shear or unusual conditions are filtered out. The site calibration results using either method C.5.2 or C.5.3 may be assessed using the method in C.5.4, where the site calibration corrections are applied to the permanent mast wind speed and this is then compared to the turbine location wind speed. Comparing the site calibration residuals against wind shear or other atmospheric stability metrics will show if the selected method accurately corrects the permanent location wind speed for all conditions or if additional steps are necessary to improve quality and reduce uncertainty. Specifically:

- a) the self-consistency parameter (Equation (C.3) in C.5.4) bin-averaged against wind speed should be between 0,98 and 1,02 in the range of 4 m/s to 16 m/s within each sector;
- b) a linear regression of $V_{\text{Turb\_predicted}}$ (Equation (C.1)) vs. $V_{\text{Turb\_measured}}$ should have an R^2 value $> 0,95$ within each sector.

C.5.1.3 Establish correlation of shear between locations

If shear is determined to be significant at the site and where there is a requirement to filter on shear at the turbine location, then it shall be established that the shear at the turbine location can be predicted from the shear measured at the reference met mast. The simplest method to achieve this is to plot the shear at the turbine location vs. the shear at the reference mast and calculate an Ordinary Least Squares linear regression. This shall be done using the filtered database. Note that this regression may be used during the power curve measurement to predict shear at the turbine location.

If the shear at the turbine location and the shear at the reference mast are not correlated for all cases, then steps shall be taken so that the data is correlated for all cases. For example, non-correlation may occur where there is a significant difference in elevation between the reference mast and test turbine location in conjunction with high shear, which is often correlated with time of day. In these cases, the suggested method to achieve correlated results is to filter the data based on time of day to remove the high shear night time data, although other methods to remove non-correlating data are permitted. The time of day filter may be established using the shear exponent vs. time of day plots. Reducing the measurement sector such that only directions with similar flow conditions are considered, filtering or breaking the site calibration up by seasons, or other methods to achieve a fully correlated data set may be used. The plots of wind shear exponent vs. wind direction may be useful in determining which sectors to use.

Any additional filter applied to the site calibration results shall also be applied to the power curve measurement. If a time of day filter is used, the filter may be adjusted seasonally to reflect longer days during the summer and shorter days during the winter. Only data from the reference mast should be used for any additional filters because it will not be possible to filter on the turbine location data during the power curve measurement.

Shear, turbulence, and wind speed are often correlated. The plots of wind shear exponent vs. wind direction, wind shear exponent vs. wind speed, and wind speed vs. time of day may be used to assess the potential impact of these filters on the power curve data in terms of

reduced data at certain wind speeds. For example, if applying a time of day filter will result in the loss of most of the data at high wind speeds, then this filter may not be practical. In the extreme case a solution could be to have multiple site calibrations, each valid for a specific range of atmospheric conditions.

C.5.2 Method 1: Bins of wind direction and wind shear

To determine if the site calibration correction factors are influenced by the shear on the site, the data shall be sorted into bins of wind direction and shear. The size of the wind direction bins shall be 10° and shall not be less than the uncertainty of the wind direction sensor. At the edges of the measurement sector, the data shall be filtered to the extents of the measurement sector. For example, where the measurement sector ends at 43° , the site calibration at the edge of the sector will be evaluated from 35° to 43° only. It is required that the choice of direction bin centre definition (e.g. either bins centred on integer multiples of 10° or bins beginning on integer multiples of 10°) shall be carried through consistently from the site calibration to the power curve test. The wind shear bins shall be in increments of 0,05 shear exponent centred on integer multiples of 0,05.

The wind speed ratios within each wind direction and wind shear bin shall be averaged.

The completion criteria for the wind direction and wind shear bins is as follows:

- a) For each wind direction bin, the number of data points across all wind shear bins within that wind direction bin shall total at least 144 (24 hours of data). Incomplete wind shear bins may be included in this total. Furthermore, each wind direction bin shall contain at least 6 hours above and 6 hours below 8 m/s.
- b) Each wind shear bin within a complete wind direction bin shall contain at least 3 data points.
- c) Wind shear bins in incomplete wind direction sectors that contain at least 6 hours of data may also be considered complete.

If after the matrix has been completed it is found that the site calibration corrections do not change with increasing wind shear, then the wind shear bins may be eliminated and the data evaluated only on a wind direction bin basis according to C.5.3. The level of change shall be evaluated against the statistical uncertainty of the site calibration.

If the variation between wind shear bins causes a higher variability in site calibration factors than twice the statistical uncertainty of the site calibration in one or more wind direction bins, the wind shear bins shall be included in the analysis alongside the wind direction bins.

If the variation between wind shear bins causes a lower variability in site calibration factors than twice the statistical uncertainty of the site calibration in one or more wind direction bins, the wind shear bins may be eliminated and the data evaluated only on a wind direction basis per C.5.3.

During the power curve measurement, the data shall be sorted into wind direction bins. For each 10 min data point, the wind shear exponent at the reference mast shall be calculated. The correction applied to the hub height wind speed shall be the wind speed ratio interpolated to the measured wind shear value from the wind shear bin average values and the measured wind shear exponent for that wind direction bin. Extrapolation is permitted for wind shear exponents falling within the last complete wind shear bins; for example if the last complete site calibration wind shear bin is the 0,6 wind shear bin, extrapolation is permitted for measured wind shear exponent values between 0,600 and 0,625 (where 0,625 is the upper edge of the 0,6 wind shear bin with a bin width of 0,05 and a range of 0,575 to 0,625). Interpolation between two complete wind shear bins across an incomplete wind shear bin is permitted. Interpolation between wind direction bins is not permitted.

C.5.3 Method 2: Linear regression method where shear is not a significant influence

The data sets shall be sorted into wind direction bins. The size of the wind direction bins shall be 10°. It is required that the choice of direction bin centre definition (e.g. either bins centred on integer multiples of 10° or bins beginning on integer multiples of 10°) shall be carried through consistently from the site calibration to the power curve test. At the edges of the measurement sector, the data shall be filtered to the extents of the measurement sector. For example, where the measurement sector ends at 43°, the site calibration at the edge of the sector will be evaluated from 35° to 43° only.

For each wind direction bin, an ordinary least squares linear regression shall be made with the turbine location wind speed as the dependent variable and the reference wind speed as the independent variable. Therefore, there will be one slope and one intercept for each wind direction bin.

Each wind direction bin shall have at least 24 h of data in total and shall have at least 6 h of data where winds are above 8 m/s and at least 6 h of data where winds are below 8 m/s. There should be a wide distribution of wind speeds within the bin to get a good correlation (see C.7.2), and it is therefore recommended that data with wind speeds at least up to 11 m/s be present. Note that outliers are highly weighted by the ordinary least squares regression method. Any outliers that appear to have a significant impact on the regression should be investigated and documented.

To illustrate the correlation between the reference and turbine location wind speed, the following plots shall be generated for each complete wind direction bin within the measurement sector:

Turbine mast wind speed vs. reference mast wind speed, including an indication of the linear regression and correlation coefficients (commonly known as the R^2 value);

On a single axis, plot the following. See Figure C.11 in Clause C.9 for an example:

- a) wind speed ratio vs. reference wind speed;
- b) bin averages of the wind speed ratios in 0,5 m/s wind speed bins;
- c) a curve $y = m + b/x$ where m is the slope of the linear regression, b is the intercept and x is the reference wind speed, and y is the predicted turbine location wind speed normalized to the reference mast wind speed, i.e. y = the wind speed ratio;
- d) a horizontal line indicating the average of all wind speed ratios within the wind direction bin.

C.5.4 Additional calculations

The site calibration flow corrections shall be applied to the reference meteorological mast data to calculate the predicted wind turbine location wind speed for each data point. This shall be done using the filtered database.

$$V_{\text{Turb\_predicted}} = F(WD, \alpha) \times V_{\text{PM}} \quad (\text{C.1})$$

where

$V_{\text{Turb\_predicted}}$	is the predicted wind turbine location wind speed;
$F(WD, \alpha)$	is the site calibration flow correction determined in C.5.2;
V_{PM}	is the reference meteorological mast wind speed;
WD	is the wind direction bin;
α	is the wind shear exponent, if applicable.

A site calibration residual shall be calculated as follows for each 10 min data point as the difference between the predicted wind turbine location wind speed and the measured wind turbine meteorological mast wind speed.

$$residual = V_{Turb\_predicted} - V_{Turb\_measured} \quad (C.2)$$

A self-consistency parameter shall be calculated as follows for each 10 min data point: divide the predicted wind turbine location wind speed by the actual wind turbine meteorological mast wind speed.

$$self\_consistency\_parameter = \frac{V_{Turb\_predicted}}{V_{Turb\_measured}} \quad (C.3)$$

The residuals and the self-consistency parameter are used to assess the variation and any biases in the results. The mean of the residuals and self-consistency parameter reflect the mean bias, where mean values of 0 and 1,0 translate to zero bias, respectively. The standard deviation of these parameters is indicative of the variation around the mean bias, and is used for the calculation of the statistical uncertainty of the site calibration.

In addition to the statistical uncertainty calculations, which are based on the variation about an assumed mean bias of zero, these parameters are used for calculation of additional uncertainty to be added in certain scenarios listed in Clause C.7, which are based on assessments of the estimated mean bias introduced by the scenario which are reflected in shifts in the mean of these parameters away from 0 and 1,0, respectively.

C.6 Site calibration uncertainty

C.6.1 Site calibration category A uncertainty

C.6.1.1 Site calibration k -fold analysis

The site calibration trains a model to predict the wind speed at the turbine location based on the wind speed at the met mast location. To avoid the risk of under-estimating the category A uncertainty due to over-fitting the model to the data, the category A uncertainty shall be calculated using k -fold cross validation with $k = 10$. Note that in the wind industry, k has different meanings, however the use of the term ' k ' here is consistent with its use in statistical learning, as the method applied is known as *k -fold cross validation*.

The final filtered data set shall be divided into k equally sized folds (partitions) based on timestamp.

For each fold ($k = 1$ through 10):

- a) the site calibration corrections shall be calculated according to Clause C.5 using only data from the other 9 folds;
- b) the site calibration corrections shall be used to calculate the predicted wind speed at the turbine location using the reference mast wind speeds measured during fold k ;
- c) the predicted turbine wind speeds in fold k shall be compared to the actual measured turbine wind speeds in fold k according to both the residual and self-consistency parameters defined in C.5.4;
- d) the statistical uncertainty for fold k shall be determined per C.6.1.2.

The total category A uncertainty is the square root of the sum of the squares of the uncertainty calculated for each fold divided by the square root of k .

$$s_{sc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k s_{sc,i}^2}{k}} \quad (C.4)$$

A value of $k=10$ is chosen so that there is a higher probability that there will be sufficient information in the remaining sets to cover the range of wind speeds present in the data set being evaluated, however other values of k are allowed so long as $k \geq 2$.

The folds are divided by timestamp rather than randomly chosen since it is expected that the variations in relationship in wind speeds between the two locations may be correlated with meteorological events which are correlated with time, and so folds that are time based are more likely to better capture variation between the conditions during the site calibration and the power curve measurement time periods.

C.6.1.2 Site calibration statistical uncertainty for each fold

For each fold in the k -fold cross validation, the deviation between the site calibration corrected wind speed at the wind turbine location and the wind speed measured at the wind turbine meteorological mast is calculated for each 10 min period, and the standard deviation of the wind speed deviation over all 10 min periods is calculated as follows:

$$d_{std,k} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (d_{j,k} - \bar{d}_k)^2}{N_k - 1}} \quad (C.5)$$

where

$d_{j,k}$ is the residual in the j -th 10 min period of fold k , see Equation (C.2);

$\bar{d}_k$ is the mean value of the residuals in fold k ;

N_k is the number of data sets in fold k ;

$d_{std,k}$ is the standard deviation of site calibration residuals in fold k .

Only data that has been included in the assessment of the site calibration shall be included in the calculation of the standard deviation.

The statistical, category A, standard uncertainty of fold k is:

$$s_{sc,k} = d_{std,k} \cdot \frac{\sqrt{N_k - 1}}{\sqrt{f \cdot N_k}} \quad (C.6)$$

where

f is number of degrees of freedom of the site calibration.

The number f is the number of 10 min periods included in the site calibration minus the total number of parameters of the site calibration algorithm. In the case where the site calibration flow corrections are in the form of bin-averaged wind speed ratios, the number of parameters of the site calibration algorithm per wind direction sub-sector equals the number of wind shear bins. f is then N_k minus the number of wind direction sub sectors (normally number of 10° wide sectors). In the case where the site calibration flow corrections are in the form of linear regressions (slopes and offsets), the number of parameters of the site calibration algorithm is 2 per wind direction sub sector. f is then N_k minus twice the number of wind direction bins. In

the case where the site calibration flow corrections are in the form of bin-averaged wind speed ratios per wind direction and wind shear bin, f is N_k minus the sum of the number of all wind shear bins in all wind direction sub-sectors.

C.6.2 Site calibration category B uncertainty

The following components of uncertainty should be considered to be independent of each other in evaluating the combined category B standard uncertainty.

$u_{VT,precal,i}$: Anemometer calibration – the anemometer calibration standard uncertainty shall be taken from the calibrations. Where the anemometer calibrations on the reference meteorological mast and wind turbine meteorological mast have been performed in the same tunnel, the estimated uncertainties are correlated to some extent; the same is true for calibrations of the anemometer(s) used for the power performance testing. A practical approach is to include the magnitude of one calibration uncertainty if the calibrations are done in the same wind tunnel. Where the calibrations have been done in different wind tunnels or different model anemometers are used, the uncertainties are independent and shall be taken into account as such.

$u_{VT,class,i}$: Anemometer operational characteristics – the wind turbine meteorological mast anemometer operational standard uncertainty shall be taken into account in the site calibration uncertainty calculation. The correlation of the operational characteristics during the site calibration shall be studied to determine to what extent the turbine and reference anemometer operational characteristic uncertainties are to be taken into account. Depending on the differences in the environmental conditions during the power curve measurement compared to during the site calibration, an increase in operational characteristics uncertainty may be required. During the site calibration the turbine anemometer operational uncertainty should be fully accounted for.

$u_{VT,mnt,i}$: Mounting effects – the wind turbine meteorological mast anemometer as well as the reference meteorological mast anemometer mounting standard uncertainty shall be taken into account in the site calibration uncertainty evaluation.

$u_{dVT,i}$: Standard uncertainty in wind speed due to the data acquisition system shall be estimated per Annex D and E.

C.6.3 Combined uncertainty

The Category A and B components of uncertainty should be considered as independent of each other for the purpose of evaluating the combined uncertainty of the site calibration.

Narrowing the measurement sector with the goal of reducing uncertainty by eliminating higher uncertainty wind direction bins is permitted.

C.7 Quality checks and additional uncertainties

C.7.1 Convergence check

A convergence check shall be carried out using the self-consistency parameter from Equation (C.3) for each wind direction bin. The most illustrative graph for this purpose plots cumulative average of the self-consistency parameter against the number of hours per wind direction bin. The cumulative averages should be seen to converge to within 0,5 % of the final average within the larger of 16 h of data or 25 % of the total number of data points in that bin. If this criteria is not met, steps such as additional filtering may be applied to try to explain and correct the non-convergence. If these steps do not result in convergence, the self-consistency check according to Clause C.8 may be performed during the power curve measurement to assess if the non-convergence is an issue. If criteria for the self-consistency check during the power curve test is not met, then the bin shall be excluded from the measurement sector.

The k -fold cross validation method used to calculate the statistical uncertainty for the site calibration should reflect a higher test uncertainty for any non-convergence, so no uncertainty penalty is applied for this check.

C.7.2 Correlation check for linear regression (see C.5.3)

For each wind direction bin, the level of correlation shall be assessed based on the correlation coefficient of the regression, commonly known as the r value. This assessment shall be included in the report.

C.7.3 Change in correction between adjacent wind direction bins

It is recommended that wind direction bins from the measurement sectors be eliminated when flow corrections change by more than 2 % between neighbouring bins. This shall be evaluated by applying the self-consistency parameter method from C.5.4 as follows:

- a) evaluate the data and calculate the site calibration flow corrections;
- b) shift the site calibration flow corrections by one direction sector so that the flow corrections or regressions are applied to the adjacent wind direction bin. For example, if the flow correction applied to the 290° bin is $1,024x + 0,1$, then apply this correction instead to the 280° bin;
- c) using the adjusted site calibration flow corrections from the previous step and the site calibration data, calculate the predicted wind turbine location wind speed for each 10 min period and then calculate the self-consistency parameter with Equation (C.3);
- d) average the self-consistency parameters for each wind direction bin. If the average is less than 0,98 or greater than 1,02, then those wind direction bins should be eliminated. If those wind direction bins are not eliminated, then the uncertainty in those bins shall be increased by the value of 1 minus the average self-consistency parameter multiplied by 100 % and divided by 2 and the square root of 3. If a sector has this applied from both adjacent sectors, then the increase in uncertainty is the average of the two.

This method shall be applied by both adding and subtracting to the wind direction bin, for example applying the 290° bin results to both the 280° and 300° bins. The uncertainty adjustment for bins not on the edge shall be the average impact of moving one adjacent bin in each direction.

$$u_{VT,coc,i,j} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|1 - sccp_{j,j-1}|}{2\sqrt{3}} + \frac{|1 - sccp_{j,j+1}|}{2\sqrt{3}} \right) \quad (C.7)$$

where

- $u_{VT,coc,i,j}$ is the standard uncertainty due to change in correction in wind direction bin j ;
- $sccp_{j,j-1}$ is the site calibration consistency parameter for wind direction bin j using the site calibration corrections in bin $j-1$;
- $sccp_{j,j+1}$ is the site calibration consistency parameter for wind direction bin j using the site calibration corrections in bin $j+1$.

For sub sectors at the edges of the measurement sector, the uncertainty shall be assessed only by applying the correction from the respective neighbouring sub sector.

C.7.4 Removal of the wind direction sensor between site calibration and power performance test

If the wind direction sensor is removed between site calibration and the power performance test, error may be introduced due to the uncertainty of the wind direction sensor alignment

between the two installations. An additional uncertainty component for each wind direction bin shall be applied. This uncertainty component shall be calculated for each wind direction bin as follows:

- a) For each wind direction bin, apply the method in C.7.3 except that the uncertainty will also be applied where the average of the self-consistency parameters is between 0,98 and 1,02.
- b) Determine the relative uncertainty in the wind direction measurements.
- c) Multiply the result of bullet a) by the ratio of the relative uncertainty in the wind vane measurements to the total wind direction bin size.

For example, the wind vane fails and is replaced by a similar model between site calibration and power curve measurement. The uncertainty in the wind vane alignments is determined to be 3° and the bin size is 10°. Multiply the change in correction between adjacent bins from C.7.3 by $\frac{3}{10}$. This uncertainty is applied in addition to any uncertainty applied due to C.7.3.

$$u_{VT,rmv,i,j} = u_{VT,coc,i,j} \cdot \left(\frac{u_{w,i}}{\text{BinSize}_j} \right) \quad (\text{C.8})$$

where

$u_{w,i}$ is the wind direction uncertainty calculated according to Clause E.12;

BinSize is the bin size of wind direction bin j , e.g. 10°.

Please note that $u_{w,i}$ may be evaluated on a relative basis, i.e. uncertainty components that are fully correlated between the site calibration and power curve measurement may be neglected. For example, if the met mast remains in place and only the sensor is replaced on the same boom and mount with an identical make and model, $u_{WVbo,i}$ and $u_{WVoe,i}$ may be neglected.

C.7.5 Site calibration and power performance measurements in different seasons

Seasonal changes in wind conditions and changes in surface roughness due to vegetation, precipitation (snow and ice) and freezing of bodies of water may cause a seasonal dependency in the site calibration flow corrections. It is therefore recommended that the site calibration and power performance measurements be conducted in the same part of the year, for example both occurring in summer. To assess the possible impact of this the following steps shall be taken:

The average wind conditions at the reference meteorological mast during the site calibration (wind shear, turbulence, upflow) shall be compared to the average wind conditions at the same meteorological mast during the power performance measurement for the wind directions within the measurement sector. An additional uncertainty shall be calculated for seasonal effects if any of these conditions for a wind direction bin differs by more than the following amounts:

- a) 0,05 for wind shear exponent;
- b) 3 % for turbulence intensity;
- c) if upflow is measured, a limit of $\pm 2^\circ$ change in vertical upflow is recommended.

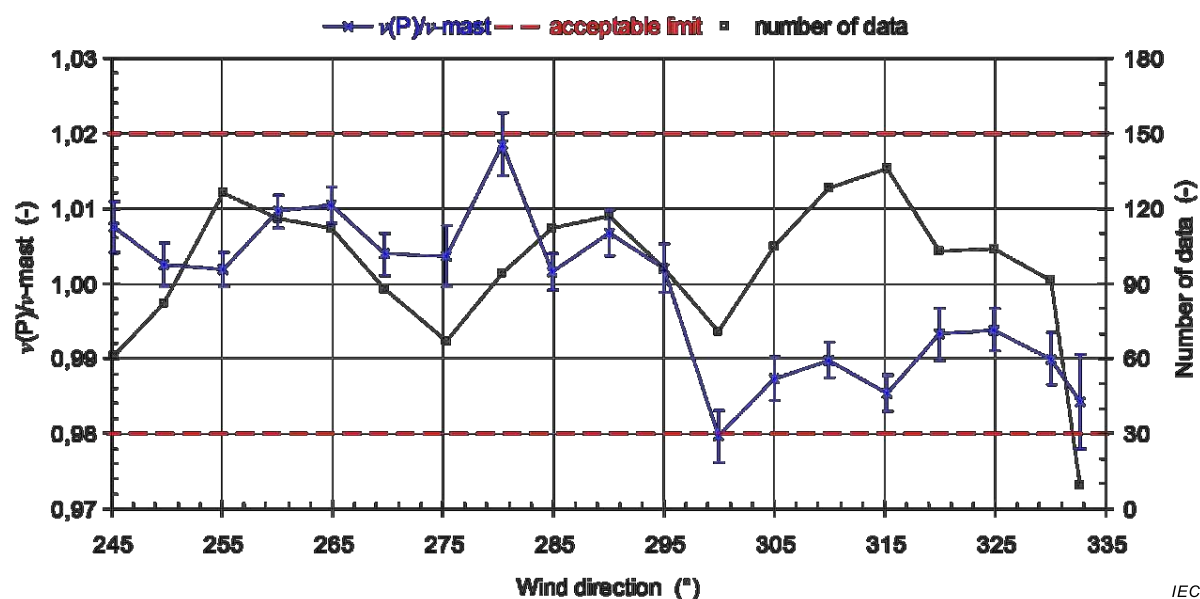
The additional uncertainty for seasonal effects shall be calculated as one third of the magnitude of the site calibration flow correction.

C.8 Verification of results

An example of a method to verify the results from a power performance measurement with or without site calibration is to use the measured electrical power data to derive a wind speed representative for the wind turbine for each 10 min period included in the power curve measurement. This wind speed is compared to the wind speed measured by the anemometer or RSD. Ideally this ratio should not vary as a function of the wind direction. Wind direction bins where the ratio varies strongly should be investigated and possibly excluded. If the power curve is a function of the rotor equivalent wind speed, the rotor equivalent wind speed should be applied for the self-consistency check.

- a) The reverse power curve is defined as the wind speed bin-averaged as a function of the power output for the data sets that have been used for the power curve evaluation. For actively controlled wind turbines, the air density normalised wind speed is used for the evaluation of the reverse power curve. For non-actively controlled wind turbines, the air density normalised power output is applied for the evaluation of the reverse power curve. If a site calibration has been performed, the site calibrated and, if applicable, air density normalised wind speed should be used for the bin analysis. The results used should include power data where the maximum power does not reach the measured nominal rated power and for which the normalized wind speed is above 4 m/s.
- b) The reverse power curve (RPC) is applied in order to evaluate the wind speed representative of the wind turbine rotor from the measurement of the active power for each 10 min interval in which the test wind turbine is operational. For this, the wind speed is interpolated linearly between the bins of the RPC according to the measured active power. The result is the wind speed representative of the wind turbine rotor. For actively controlled wind turbines, the result is the air density normalised ambient wind speed representative of the wind turbine rotor. For non-actively controlled wind turbines, the air density normalised power output should be used for the evaluation of the ambient wind speed.
- c) The ratio of the two wind speeds (derived/measured) should be bin-averaged as function of the wind direction in 5° sectors.
- d) The derived and measured wind speeds are expected to be in good agreement for the measurement sector and hence the ratio should be near unity. Deviations from unity may occur due to site effects, imperfections of the site calibration procedure, or influences of environmental variables on the power curve. Sectors where the wind speed determined via the meteorological mast is not representative for the test wind turbine can clearly be identified as variations of the bin-averaged ratio. Larger deviations should be analysed further. These sectors should be excluded from the final power curve test if site effects are identified as the reason.
- e) The power curve should be re-evaluated for the remaining sector. The self-consistency check may be repeated with the re-calculated RPC. If necessary, the measurement sector should be adjusted in accordance with the results of the repeated test.

An example of a result of a verification test is shown in Figure C.3.



The error bars indicate the category A standard uncertainty of the bin averaged ratios of v_P and v_{mast} . The acceptable range is for ratios of 0,98 to 1,02 for $L < 3$ rotor diameters and 0,97 to 1,03 for L between 3 and 4 rotor diameters.

Figure C.3 – Example of the results of a verification test

C.9 Site calibration examples

C.9.1 Example A

Site description:

A power curve measurement is to be undertaken on a ridgeline site (Type B Terrain). The ridgeline is perpendicular to the principle wind direction, facing a plain and the ridge is approximately 40 m to 60 m higher than the plane. The wind turbines have a hub height of 80 m and are located in a single row along the top of the ridge.

The terrain type is between a type A and type B terrain. The relatively flat terrain up-wind of the ridge means that high wind shear may be a concern due to atmospheric stability; however the terrain local to the wind turbines is closer to a type B site where high upflow angles may also be a concern. The test wind turbine and meteorological mast location are therefore chosen to best minimize the possible upflow angle (lower local terrain slope) and to minimize the difference in elevation between the two locations (which will maximise correlation of wind speed flow corrections with different wind shear profiles) as much as possible given the wind turbine layout and terrain constraints.

Site calibration setup:

The reference meteorological mast is located on the ridge, next to the test wind turbine but at a slightly lower elevation that is about 10 m lower than the wind turbine elevation.

In addition to top mounted hub height cup anemometers in a side-by-side configuration, wind shear measurements are included in the form of anemometers located at 43 m elevation on both meteorological masts. A 3D ultrasonic anemometer is mounted on each meteorological mast to assess the operational characteristics of the hub height anemometers to quantify the uncertainty at the given terrain complexity.

Site calibration evaluation:

Data are collected for several months. The collected data are filtered based on the measurement sector, the wind speeds from 4 m/s to 16 m/s as recorded at the reference meteorological mast, sensor malfunction, and anemometer icing.

For each 10 min period, the following calculations are made according to C.5.1:

- the ratio of the hub height wind speed at the wind turbine location to the hub height wind speed at the reference meteorological mast;
- the wind shear exponents at each meteorological mast are calculated from the power law using the wind speed measurements at 80 m and 43 m;
- a tag representing the time of day on a 24 h clock is calculated from the timestamp;
- upflow angle is calculated from the vertical and horizontal wind speeds from the ultrasonic anemometers at each meteorological mast.

Step 1: Check the significance of wind shear at the site according to C.5.1.2:

For the filtered data, the wind shear exponent at each meteorological mast is plotted against time of day.

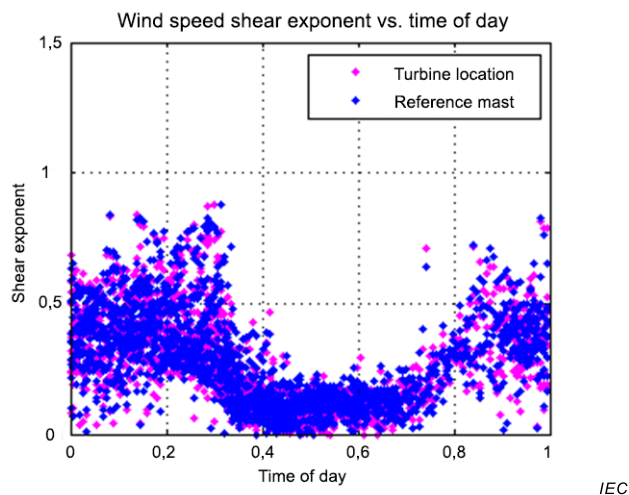


Figure C.4 – Wind shear exponent vs. time of day, example A

From Figure C.4 it is observed that wind shear is high at night and low during the day. This is typical of a site experiencing a diurnal cycle of atmospheric stability. At night, the atmosphere forms thermal layers (stable atmosphere). These layers suppress turbulence and result in variably high wind shear. During the day, the sun heats up the ground, introducing turbulent mixing which results in a more uniform wind speed profile (low wind shear) and higher turbulence.

It also appears that similar values of wind shear are occurring at both the wind turbine and reference meteorological mast locations.

Step 2: Verify correlation of wind shear at wind turbine and reference meteorological mast locations – Example A

To verify that the wind shear exponent values are correlated between the wind turbine and reference meteorological mast locations, a plot of the wind shear exponents at the wind turbine location vs. the wind shear exponents at the reference meteorological mast is made (see Figure C.5):

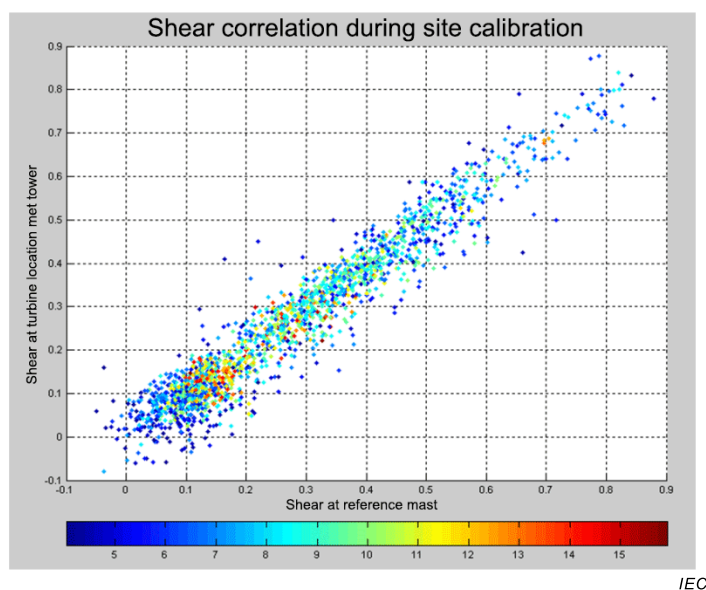


Figure C.5 – Wind shear exponents at wind turbine location vs. reference meteorological mast, example A where the colour axis = wind speed (m/s)

The wind shear exponents at the reference meteorological mast are a reasonably good indicator of the wind shear exponents at the wind turbine location.

Step 3: Calculate results according to C.5.1.3

The following calculations are made for each 10-minute data set based on measurements at the reference mast:

- wind shear bins centred on integer multiples of 0,05 values of wind shear exponent (–0,025 to 0,025, 0,025 to 0,075, 0,075 to 0,125, etc.).

It is now possible to make a matrix of wind shear exponent and wind direction. For each point in this matrix, the following calculations are made:

- the correction for each point in the matrix is calculated as the average of the wind speed ratios in that matrix bin;
- a count of all valid data points within that matrix bin.

Table C.1 and Table C.2 show the site calibration flow corrections and bin count, respectively. Figure C.6 is a graphical illustration of these results.

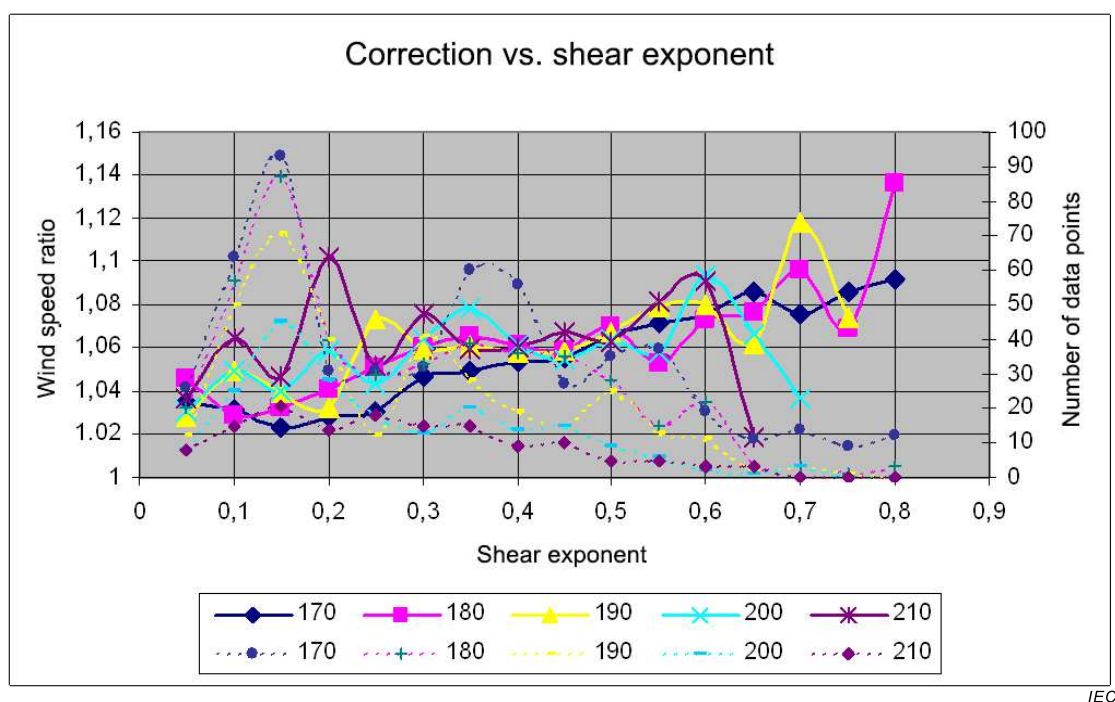


Figure C.6 – Wind speed ratios and number of data points vs. wind shear exponent and wind direction bin – wind speed ratios (full lines), number of data points (dotted lines)

Step 4: Quality checks and additional uncertainties

Anemometer operational characteristic uncertainty:

The upflow angle was recorded, which allows for the estimation of anemometer operational characteristic uncertainty at the site conditions according to C.3.2. The maximum upflow angle for all data points in all wind direction bins was 3° at the reference meteorological mast and 1° at the wind turbine location mast. All other parameters fell within the range of the Class A anemometer operational characteristics. Therefore, the Class A anemometer operational characteristic uncertainty may be used for both locations. The class is 1,4A.

Table C.1 – Site calibration flow corrections (wind speed ratio)

	Wind direction bin				
Wind shear bin	170	180	190	200	210
0,05	1,035	1,046	1,028	1,031	1,037
0,10	1,031	1,029	1,05	1,05	1,064
0,15	1,023	1,033	1,039	1,04	1,047
0,20	1,028	1,041	1,032	1,059	1,102
0,25	1,031	1,051	1,073	1,044	1,052
0,30	1,047	1,06	1,06	1,064	1,076
0,35	1,049	1,066	1,062	1,078	1,06
0,40	1,054	1,061	1,058	1,061	1,06
0,45	1,055	1,058	1,059	1,055	1,067
0,50	1,066	1,07	1,067	1,064	1,063
0,55	1,072	1,053	1,079	1,058	1,081
0,60	1,076	1,074	1,08	INC	1,091
0,65	1,086	1,076	INC	INC	1,019
0,70	1,076	1,096	1,118	INC	INC
0,75	1,086	INC	INC	INC	INC
0,80	1,092	1,136	INC	INC	INC

Table C.2 – Site calibration data count

	Wind direction bin				
Wind shear bin	170	180	190	200	210
0,05	26	20	12	8	8
0,10	64	57	50	25	15
0,15	93	87	71	45	21
0,20	31	40	40	28	14
0,25	31	30	12	18	18
0,30	32	33	41	13	15
0,35	60	39	28	20	15
0,40	56	36	19	14	9
0,45	27	35	15	15	10
0,50	35	28	25	9	5
0,55	37	15	13	6	5
0,60	19	22	11	2	3
0,65	11	3	2	1	3
0,70	14	3	3	3	0
0,75	9	1	1	0	0
0,80	12	3	0	0	0

Convergence check:

The convergence check found that the data converged to within 0,5 % of the final value (or within 0,995 and 1,005 in Figure C.7 for the 190° bin using over 50 h of data in the bin meeting the requirement, the larger of 16 h or 25 % of the total number of data points for all bins.

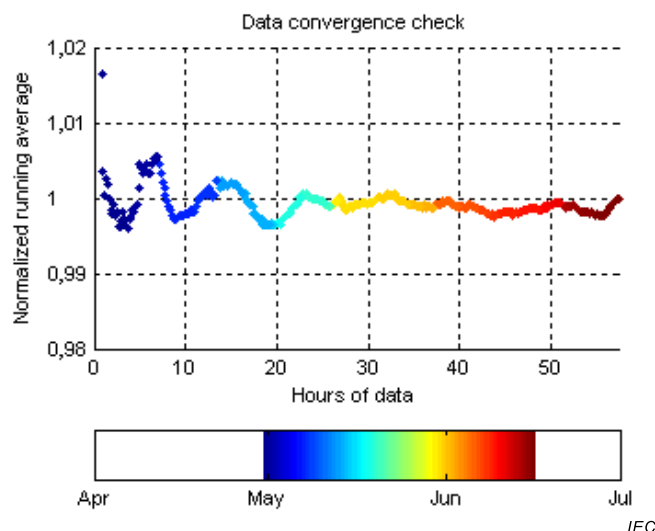


Figure C.7 – Data convergence check for 190° bin

Change in correction between bins:

The magnitude of the change in flow corrections was within 0,02 between all adjacent bins.

Wind vane adjustment:

No wind vane adjustment was made between measurements, so no additional uncertainty is required.

Seasonal uncertainty:

The power curve measurement fell during the same seasonal period and a comparison found that none of the changes in conditions exceeded the limits of C.7.5 so no additional uncertainty is needed to account for seasonal effects.

C.9.2 Example B**Site description:**

The site is identical to the site in example A (Type B terrain) except that the local terrain to the wind turbine is slightly steeper.

Site calibration setup:

Unlike example A, it was not possible to locate the reference meteorological mast on the ridge. The reference meteorological mast is located at the base of the ridge (on the plain) 3 rotor diameters upwind of the test wind turbine that is on the top of the ridge. The difference in elevation between the test wind turbine and the reference meteorological mast is 45 m.

Step 1: Check the significance of wind shear at the site

For the filtered data, the wind shear exponent at each meteorological mast is plotted against time of day (see Figure C.8).

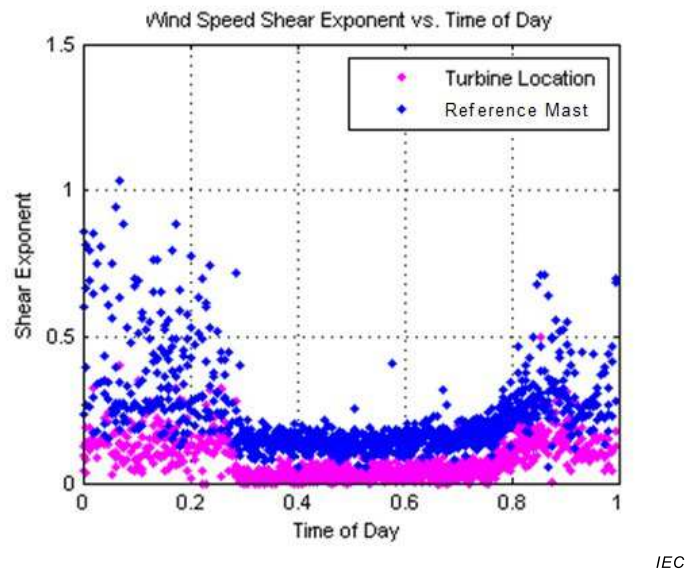


Figure C.8 – Wind shear exponent vs. time of day, example B

Similar to example A, the wind shear at night is higher than during the day, indicating a diurnal cycle of atmospheric stability. However, the wind shear at the wind turbine location appears to be significantly different than the wind shear at the reference meteorological mast. This will be problematic due to the change in elevation between the two locations, it is reasonable to assume that the relationship between the hub height wind speeds will be influenced by changes in the wind shear profile.

Step 2: Verify correlation of wind shear at wind turbine and reference meteorological mast locations – Example B

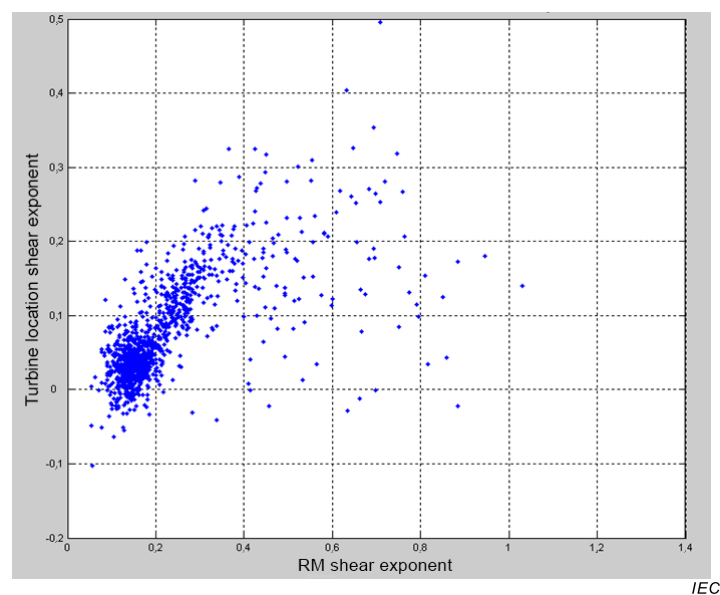
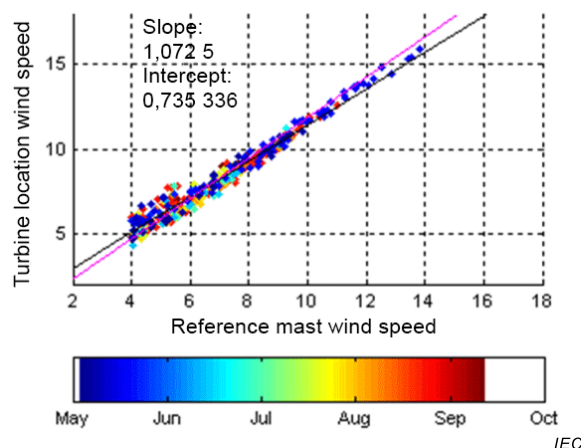


Figure C.9 – Wind shear exponents at wind turbine location vs. reference meteorological mast, example B

There is no correlation for wind shear values greater than 0,25. This suggests that the correlation of site calibration flow corrections will be inconsistent during stable atmospheric conditions. To illustrate/verify that this is the case, the plots specified in C.5.3 may be used (see Figure C.10):



The red line is the linear regression forced through origin (zero intercept), the black line is the two parameter linear regression (non-zero intercept).

Figure C.10 – Linear regression of wind turbine location vs. reference meteorological mast hub height wind speeds for 330° bin

The linear regression shows that there is a significant intercept in the linear regression. There is also high scatter at the lower wind speeds.

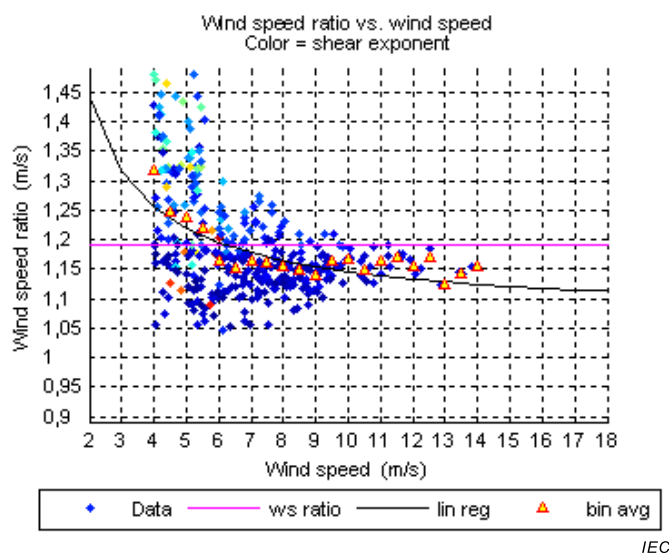


Figure C.11 – Wind speed ratios vs. wind speed for the 330° bin

The plot of wind speed ratio vs. wind speed (see Figure C.11) shows the high dependency of the flow correction on wind speed due to the high intercept. Also note that the overall magnitude of the flow correction is quite high, 19 % on average.

For illustrative purposes, a plot of the wind speed ratios vs. wind shear for the different wind bins is shown in Figure C.12.

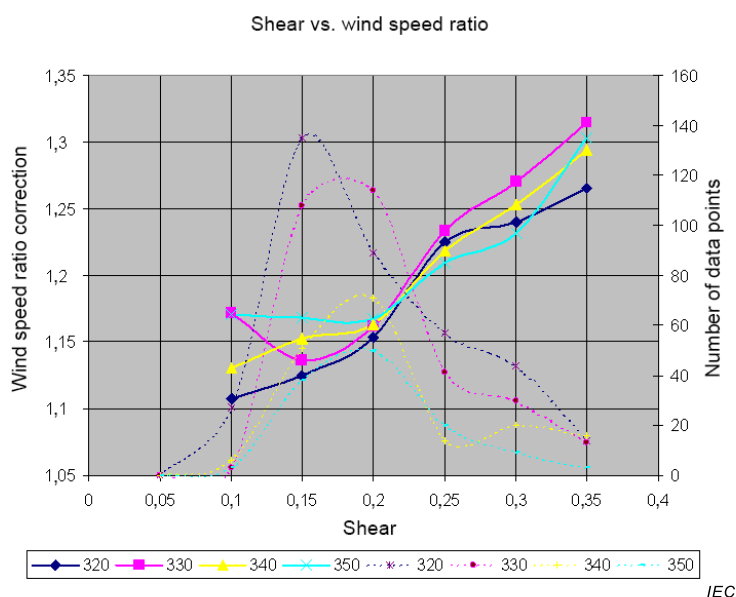


Figure C.12 – Wind speed ratios vs. wind shear for the 330° bin

These plots are useful illustrations of the impact to the site calibration due to the conditions at this site and the test setup. Figure C.12 shows that the correction changes by more than 5 % between 0,20 and 0,25, and Figure C.9 shows that the wind shear at the reference meteorological mast is not a good predictor of the wind shear at the wind turbine location for values greater than 0,25. Corrections using the wind direction-wind shear matrix method may not be reliable. Wind shear has been shown to have a significant influence and wind shear at the two locations is not well correlated so therefore additional filtering is necessary to try to improve the correlation.

Step 2B: Attempt to remove non-correlating wind shear data

Low wind shear values appear to be correlated between the two locations. Low wind shear values occur during the day time (periods of atmospheric instability), therefore from the plots, a time-of-day filter is applied to select all daytime data between 07:00 and 19:00.

Plots according to C.5.2 are shown for the newly filtered data set (see Figure C.13, Figure C.14 and Figure C.15).

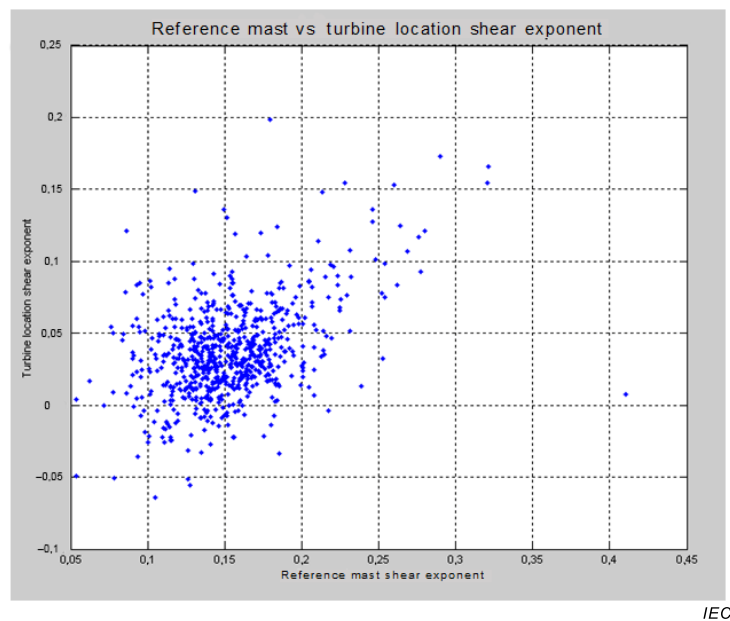


Figure C.13 – Wind shear exponents at wind turbine location vs. reference meteorological mast post-filtering

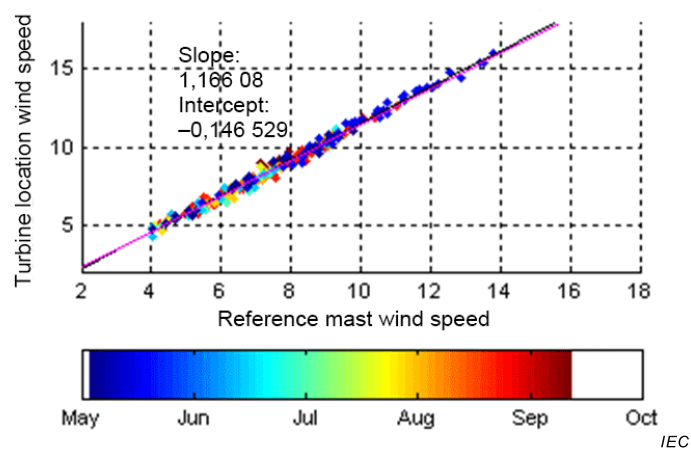


Figure C.14 – Linear regression of wind turbine location vs. reference meteorological mast hub height wind speeds for 330° bin, post-filtering

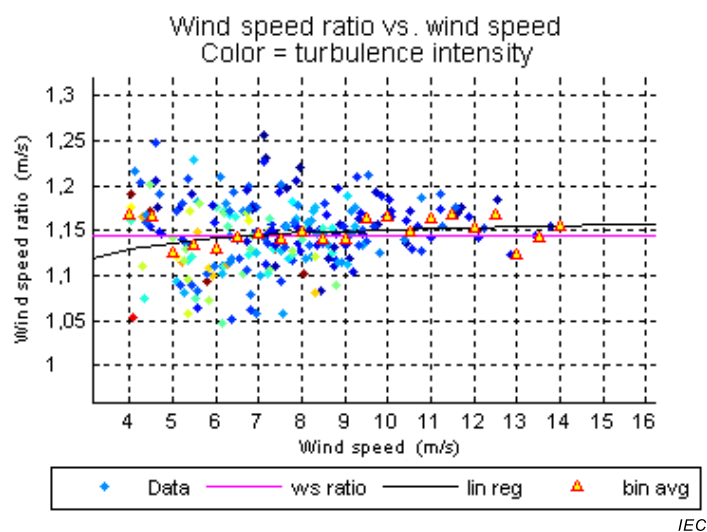


Figure C.15 – Wind speed ratios vs. wind speed for the 330° bin, post-filtering

Step 3: Calculate results

The previous step removed all of the data with high atmospheric stability leaving only day-time data with atmospheric instability. The wind shear values include a small range of wind shear exponents (0,10 to 0,20). This removes the dependence of the site calibration flow corrections on wind shear and so the linear regression method may be used instead of the wind direction – wind shear bin matrix.

For each wind direction bin, a linear regression of the wind speed at the wind turbine location vs. the wind speed at the reference meteorological mast is calculated along with the r^2 value of the regression. The count of total valid data points in each wind direction bin is also recorded.

Step 4: Additional uncertainties

Anemometer operational uncertainty:

No vertical wind speed measurement was included so the Class B operational characteristic uncertainty shall be used. The anemometer operational characteristic classification is 5,4B.

Convergence check (see Figure C.16):

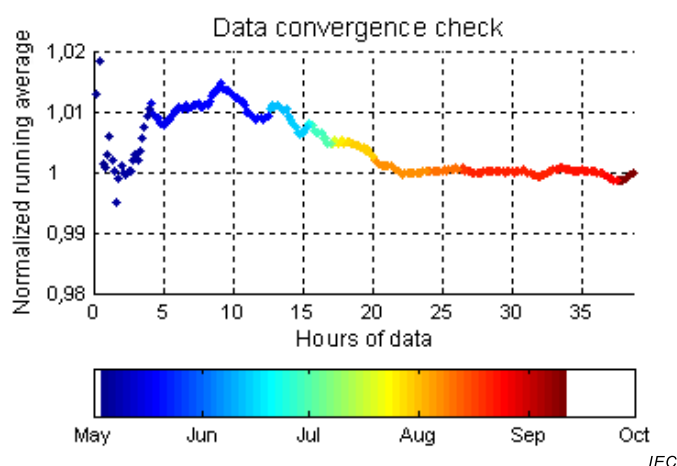


Figure C.16 – Data convergence check for 330° bin

Correlation check for linear regression:

As per C.7.2 (see Table C.3).

Table C.3 – r^2 values for each wind direction bin

Bin centre	r^2 value	Absolute value of residual mean (m/s)	Residual standard deviation (m/s)
320	0,978	0,00	0,33
330	0,988	0,00	0,26
340	0,979	0,00	0,26
350	0,981	0,00	0,23

Change in correction between bins:

As per C.7.3 (see Table C.4).

Table C.4 – Additional uncertainty due to change in bins

Bin centre	Magnitude of change between bins (left)	Magnitude of change between bins (right)	Additional standard uncertainty (%)
320	1,019	-	0 % (within limit)
330	1,009	0,981	0 % (within limit)
340	1,013	0,988	0 % (within limit)
350	-	0,992	0 % (within limit)

Wind vane adjustment:

The wind vane was left in place so no additional uncertainty is required per C.7.4.

Seasonal uncertainty:

The site calibration was conducted in the winter while the power curve measurement was conducted spanning multiple seasons, including the summer. Note that the time of day filter needed to be adjusted due to the change in sunrise and sunset. A comparison of the wind

shear exponent values (see Figure C.17) found a change greater than 0,05 (0,15 vs. 0,22), which is greater than the limits of C.7.5 so additional uncertainty due to the measurements being in different seasons is required per C.7.5.

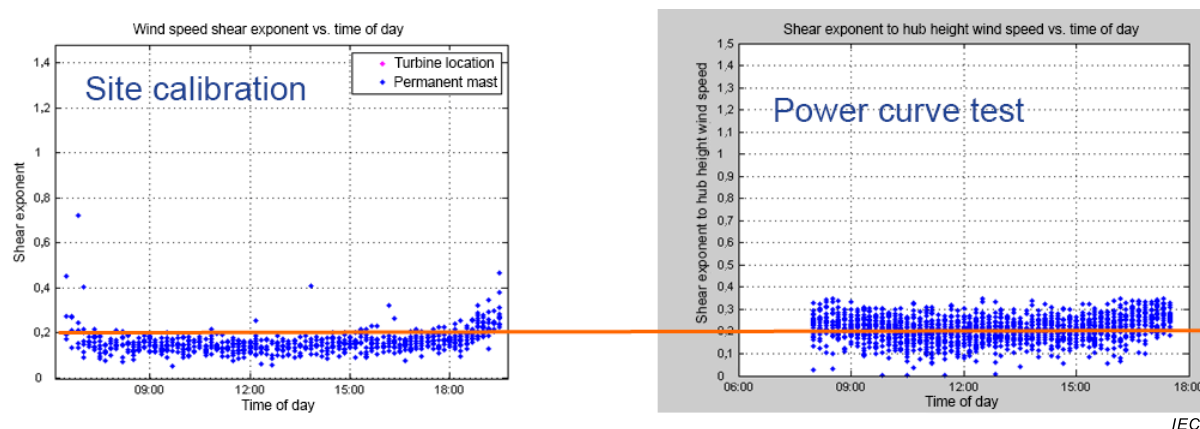


Figure C.17 – Site calibration wind shear vs. power curve test wind shear

The seasonal correction component is one-third of the magnitude of the total correction. This may be calculated for each data point as:

$$U = 1/3 \times \text{abs}(V_{\text{Turb\_predicted}} - V_{\text{RM\_measured}}) \quad (\text{C.9})$$

where

- U is the standard uncertainty in one data point;
- $V_{\text{Turb\_predicted-}i}$ is the wind turbine predicted wind speed applying site calibration flow correction;
- $V_{\text{RM\_measured-}i}$ is the measured wind speed from the reference meteorological mast used to predict the wind at the wind turbine.

The uncertainties during the power performance test may then be bin averaged against reference meteorological mast wind speed and direction to calculate the total uncertainty.

C.9.3 Example C

Site description:

The site is in very complex terrain. The site is a mountain top site within a mountain range. The site is a ridgeline site perpendicular to the principle wind direction, with terrain dropping off steeply in front of and behind the ridge. The wind is very mono-directional with nearly all winds coming from a 30° sector. There is another ridge line 3 km directly up-wind a few hundred meters taller than the ridgeline on which the site is located. The site is therefore considered to be type C terrain as it may be located in a recirculation zone from the upwind ridge.

Site calibration setup:

The meteorological mast is located 2,5 rotor diameters from the test wind turbine on the same ridge and at a very similar elevation (within 5 m). Wind shear was measured using anemometers mounted lower on the meteorological masts. A vertical wind speed measurement was not included.

Step 1: Check the significance of wind shear at the site

Wind shear exponent values are low and sometimes negative. All wind shear values are between $-0,05$ and $0,20$ and with no obvious correlation to time of day or other measured conditions. Turbulence is high. This indicates neutral to unstable atmosphere and wind shear is not therefore considered to be a significant factor for the site calibration, so the linear regression method may be used.

Step 2:

Skipped as wind shear has already been determined to be low. There is no stable atmosphere at this site.

Step 3: Calculate results

For each wind direction bin a linear regression of the wind speed at the wind turbine location vs. the wind speed at the reference meteorological mast is calculated along with the r^2 value of the regression. The count of total valid data points in each wind direction bin is also recorded. The data scatter is very high and the magnitude of the change in flow correction between bins was also very high.

Step 4: Quality checks and uncertainty

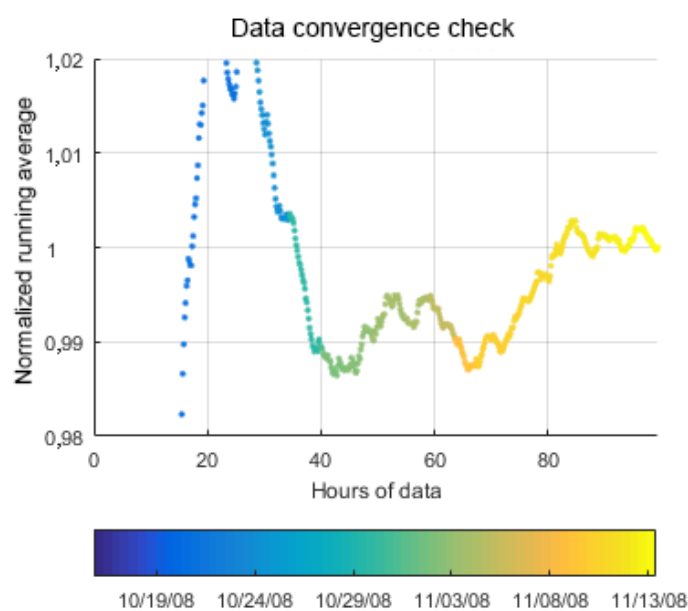
The data confirms that the site is in a recirculation zone of the up-wind ridge. The data scatter is very high and the results do not converge, indicating that despite the reference meteorological mast and test wind turbine being located side by side on the ridge at similar elevation with similar local terrain, the correlation in wind speed between the two locations is very poor. This will have negative consequences on the accuracy and uncertainty of a power curve measured at this location.

Anemometer operational uncertainty:

No vertical wind speed measurement was included so the Class B operational characteristic uncertainty shall be used. The anemometer operational characteristic classification is 5,4B.

Convergence check:

The data fails the convergence check for all wind direction bins. The data does not converge to within 0,5 % of the final value until 75 % of the data collected has been included. A sample check for one of the wind direction bins is shown in Figure C.18 below.



IEC

Figure C.18 – Convergence check for 270° bin

Change in magnitude of correction between bins:

All adjacent bins had changes in magnitude on the order of 10 %. The additional uncertainty is calculated as follows.

Table C.5 – Additional uncertainty due to change in bins

Bin centre	Magnitude of change between bins (left)	Magnitude of change between bins (right)	Additional standard uncertainty (%)
260	1,137	1,176	4,52 %
270	1,093	0,912	2,61 %
280	1,023	0,946	1,11 %

Wind vane adjustment:

No wind vane adjustment was made, so no additional uncertainty is required.

Seasonal uncertainty adjustment:

The site calibration and power performance test were conducted in different seasons (fall and summer), however the wind shear and turbulence values did not change by more than the allowable limits between seasons. A vertical wind speed was not recorded to assess the upflow angle, however given that the site is in a recirculation zone, a wide range of upflow angles are expected and there is no reason to expect seasonal dependence. The site was located in a hot climate with minimal vegetation, so no appreciable change in the surface roughness is expected.

No additional uncertainty for seasonal changes is necessary.

Annex D (normative)

Evaluation of uncertainty in measurement

Annex D addresses the requirements for the determination of uncertainty in measurement. The theoretical basis for determining the uncertainty using the method of bins, with a worked example of estimating uncertainties, can be found in Annex E.

The measured power curve shall be supplemented with an estimate of the uncertainty of the measurement. The estimate shall be based on the ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995).

Following the ISO/IEC Guide 98-3, there are two categories of uncertainties: category A, the magnitude of which can be deduced from measurements, and category B, which are estimated by other means. In both categories, uncertainties are expressed as standard deviations and are denoted standard uncertainties.

a) The measurands

The measurands are the power curve, determined by the measured and normalized bin values of electric power and wind speed (see 9.1 and 9.2), and the estimated annual energy production (see 9.3). Uncertainties in the measurements are converted to uncertainty in the measurand by means of sensitivity factors.

b) Uncertainty components

Table D.1 provides a minimum list of uncertainty parameters that shall be included in the uncertainty analysis.

Table D.1 – List of uncertainty components

Measured parameter	Uncertainty component	Uncertainty category
Electric power	Current transformers	B
	Voltage transformers	B
	Power transducer or power measurement device	B
	Data acquisition system (see below)	B
	Variability of electric power	A
Wind speed (cup and sonic anemometer)	Anemometer calibration	B
	Classification	B
	Mast flow distortion	B
	Boom flow distortion	B
	Lightning finial	B
	Data acquisition system (see below)	B
	Post calibration / in-situ test	B
Wind speed (remote sensing device)	Verification test for RSD	B
	In-situ test	B
	RSD classification	B
	Mounting effects	B
	Flow variation across probe volume at same height	B
	Monitoring test	B
Rotor equivalent wind speed	Wind shear measurement	B

Measured parameter	Uncertainty component	Uncertainty category
	Wind veer measurement	B
Wind direction (vane or sonic)	Calibration	B
	North mark	B
	Boom orientation	B
	Operation (influence of mast)	B
	Magnetic declination angle	B
	Data acquisition system (see below)	B
Wind direction (remote sensing device)	Verification test	B
	Classification	B
	Monitoring test	B
	Flow variation across probe volume at same height	B
	Alignment	B
	Magnetic declination angle	B
	Data acquisition system (see below)	B
Air temperature	Temperature sensor	B
	Radiation shielding	B
	Mounting effects	B
	Data acquisition system (see below)	B
Air pressure	Pressure sensor	B
	Mounting effects	B
	Data acquisition system (see below)	B
Relative humidity	Humidity sensor	B
	Mounting effects	B
	Data acquisition system (see below)	B
Data acquisition system	Signal transmission	B
	System accuracy	B
	Signal conditioning	B
Terrain (no site calibration)	Flow distortion due to terrain	B
Terrain (with site calibration)	Anemometer calibration before test	B
	Post calibration/In-situ calibration	B
	Anemometer classification	B
	Mounting effects	B
	Standard mounting	B
	Alternative mounting	B
	Side mounted	B
	Lightning finial	B
	Data acquisition system (see below)	B
	Change of correction (adjacent wind direction bins)	B
		B
	Removal of wind direction sensor between site calibration and power curve measurement	B
	Seasonal variation	A
	Statistical variability in site calibration	
Method	Air density correction	B
	Wind conditions – missing shear information	B

Measured parameter	Uncertainty component	Uncertainty category
	Wind conditions – missing veer information	B
	Wind conditions – missing upflow information	B
	Wind conditions – missing turbulence information	B
	Seasonal effects	B
	Turbulence normalisation (or lack of turbulence normalisation)	B
	Cold climate measurements	B

It should be noted that the implicit assumption of the hub height wind speed power curve method of this standard is that the 10 min mean power yield from a wind turbine is fully explained by the simultaneous 10 min mean wind speed measured at hub height and the air density.

This is not the case. Other flow variables affect power yield and thus identical wind turbines will yield different power at different sites even if the hub height wind speed and air density are the same. These other variables include turbulence fluctuations of wind speed (in three directions), the inclination of the flow vector relative to horizontal, scale of turbulence and wind shear of mean wind speed over the rotor. Presently, analytical tools offer little help in identification of the impact of some of these variables and experimental methods encounter equally serious difficulties.

The result is that the power curve will vary from one site to the next which will appear as uncertainty.

This uncertainty stems from differences in observed power yield under different topographical and climatic conditions, i.e. when comparing an *AEP* measured in homogeneous terrain with an *AEP* measured at a non-homogeneous wind farm site.

Quantification of this apparent uncertainty is difficult. Depending on site conditions and climate, the uncertainty may amount to several percent. In general terms, the uncertainty may be expected to increase with increasing complexity of topography and with increasing frequency of non-neutral atmospheric conditions.

However, this issue of the standard presents methods to account for at least some of these influential variables (for example wind shear and turbulence). The uncertainty in these correction methods shall also be assessed. It is therefore implicit that where these variables are considered significant and a correction is not made then the uncertainty should be increased to account for the lack of a correction.

Annex E (informative)

Theoretical basis for determining the uncertainty of measurement using the method of bins

E.1 General

In Annex E, all the uncertainty statements made throughout the standard have been combined and added to in order to make a consistent uncertainty evaluation of a power curve measurement, covering both the power curve and the calculated *AEP*.

In order to achieve a clear structure to introduce this rather complex topic, this annex has been structured as shown below. The main structure is based on a separate section for each category of uncertainty components; as wind speed has many uncertainty components these have been given their own clauses, as seen below:

Clause E.2	A general mathematical outline and a table with an overview of all uncertainty components and their default magnitudes.
Clause E.3	Category A uncertainties
Clause E.4	Category B uncertainties – Introduction and data acquisition
Clause E.5	Category B – Power output
Clause E.6	Category B – Wind speed – Introduction and sensors
Clause E.7	Category B – Wind speed – RSD
Clause E.8	Category B – Wind speed – REWS
Clause E.9	Category B – Wind speed – Terrain
Clause E.10	Category B – Air density
Clause E.11	Category B – Method
Clause E.12	Category B – Wind direction
Clause E.13	Combining uncertainties.

In this annex, a calculation method is given for aggregating uncertainties, as well as relevant tables for correlation factors and a (non-exhaustive) numerical example.

For all the category B uncertainties, a description is given as to what that uncertainty component covers, the symbol used for each component, references to other annexes where the component is discussed and a discussion of the default magnitude.

E.2 Combining uncertainties

E.2.1 General

In its most general form, the combined standard uncertainty of the power in bin i , $u_{c,i}$ can be expressed by:

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M c_{k,i} u_{k,i} c_{l,i} u_{l,i} \rho_{k,l,i,i} \quad (\text{E.1})$$

where

- $c_{k,i}$ is sensitivity factor of component k in bin i ;
- $u_{k,i}$ is the standard uncertainty of component k in bin i ;
- M is the number of uncertainty components in each bin;
- $\rho_{k,l,i,j}$ is the correlation coefficient between uncertainty component k in bin i and uncertainty component l in bin j (in the expression the components k and l are both in bin i).

The uncertainty component is the individual input quantity to the uncertainty of each measured parameter. The combined standard uncertainty in the estimated annual energy production, u_{AEP} , can in its most general form be expressed by

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M f_i c_{k,i} u_{k,i} f_j c_{l,j} u_{l,j} \rho_{k,l,i,j} \quad (\text{E.2})$$

where

- f_i is the relative occurrence of wind speed within bin i ;
- N is the number of bins;
- N_h is the number of hours in one year $\approx 8\,760$.

It is seldom possible to deduce explicitly all the values of the correlation coefficients $\rho_{k,l,i,j}$ and normally significant simplifications are necessary. To allow the above expressions of combined uncertainties to be simplified to a practical level, the following assumptions may be made:

- a) uncertainty components are either fully correlated ($\rho_{k,l,i,j} = 1$, implying linear summation to obtain the combined standard uncertainty) or independent ($\rho_{k,l,i,j} = 0$, implying quadratic summation, i.e. the combined standard uncertainty is the square root of summed squares of the uncertainty components);
- b) category A uncertainties are uncorrelated across wind speed bins, while category B uncertainties are fully correlated across wind speed bins;
- c) only relevant for site calibration uncertainties: category A uncertainties are uncorrelated across wind direction bins, while category B uncertainties are fully correlated across wind direction bins.

The correlation of the same type of uncertainty across different wind measurement heights when calculating the uncertainty of the rotor equivalent wind speed or a wind shear/veer normalised wind speed shall be assessed individually for each component and each case. Each uncertainty may first be accumulated across the measurement heights for a certain bin of the rotor equivalent or wind shear/veer normalised wind speed. Afterwards the uncertainty components of the rotor equivalent wind speed or the wind shear/veer normalised wind speed can be treated as described in bullet points a) and b).

Using these assumptions, the combined uncertainty of the power within a bin, $u_{c,i}$ can be expressed by:

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + \sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2 = s_i^2 + u_i^2 \quad (\text{E.3})$$

where

- M_A is the number of category A uncertainty components;
- M_B is the number of category B uncertainty components;
- $s_{k,i}$ is the category A standard uncertainty of component k in bin i ;
- s_i is the combined category A uncertainties in bin i ;

u_i is the combined category B uncertainties in bin i .

It should be noted that $u_{c,i}^2$ is not independent of bin size due to the dependency of $s_{p,i}$ on the number of data sets in the bin (see Equation (E.10)).

The assumptions imply that the combined standard uncertainty in energy production, u_{AEP} , is:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B} \left(\sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i} \right)^2 \quad (\text{E.4})$$

The significance of the second term in this equation is that each individual category B uncertainty component progresses through to the corresponding AEP uncertainty, applying the assumption of full correlation across bins for the individual components. Finally, the cross-bin combined uncertainty components are added quadratically into a resulting AEP uncertainty.

Furthermore, certain components of category A uncertainty cannot necessarily be conveniently derived or estimated on a bin-wise basis. For example the site calibration method category A components which may have been derived by a sensitivity analysis on the AEP calculation. In that case, these components should be added quadratically into the resulting AEP uncertainty. Refer to Equation (E.8) for an example of this.

In practice, it may not be convenient to sum category B uncertainty components across the bins before they are individually combined. An approximation, allowing the category B uncertainty components to be combined within bins before they are combined across bins (i.e. s_i and u_i can be used), leads to the more convenient expression:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2} \right)^2 =$$

$$N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2 \quad (\text{E.5})$$

The u_{AEP} , obtained by this expression is always equal to or larger than that obtained using Equation (E.4).

E.2.2 Expanded uncertainty

The combined standard uncertainties of the power curve and the AEP may additionally be expressed by expanded uncertainties. Referring to the ISO/IEC Guide 98-3 and assuming normal distributions, intervals having levels of confidence shown in Table E.1 can be found by multiplying these combined standard uncertainties by a coverage factor also shown in the table.

Table E.1 – Expanded uncertainties

Level of confidence %	Coverage factor
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

E.2.3 Basis for the uncertainty assessment

The calculation methodology goes through an estimate of the category A and B uncertainties for each bin of a measured power curve. The uncertainty of the power curve is derived, and finally the uncertainty of the annual energy production (*AEP*) is estimated. Please note that a fully worked out example has not been included, due to the differences in calculations for the various measurement approaches. Where possible a worked-out example for part of the calculation has been included to show how the equations and estimates of default values for uncertainty components have been applied.

The calculation methodology follows the ISO guide and the assumptions made above. Using the combination of the category B uncertainty components according to Equation (E.5), all uncertainty components within each bin can be combined first to express the combined category B uncertainty of each measured parameter, as for example for the wind speed:

$$u_{V,i}^2 = u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + \dots \quad (\text{E.6})$$

where uncertainty components refer to the uncertainty components in Table E.2, using symbols and indices as in the table.

Secondly, the standard uncertainties of the measurands can be expressed by the uncertainties of the measurement parameters in bin i :

$$u_{c,i}^2 = s_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 s_{SC,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{M,i}^2 \quad (\text{E.7})$$

where

- $s_{P,i}$ is the category A standard uncertainty of power in bin i ;
- $s_{SC,i}$ is the category A standard uncertainty of site calibration in bin i ;
- $u_{P,i}$ is the category B standard uncertainty of power in bin i ;
- $u_{V,i}$ is the category B standard uncertainty of wind speed in bin i ;
- $u_{T,i}$ is the category B standard uncertainty of temperature in bin i ;
- $u_{B,i}$ is the category B standard uncertainty of pressure in bin i ;
- $u_{RH,i}$ is the category B standard uncertainty of relative humidity in bin i ;
- $u_{M,i}$ is the category B standard uncertainty of the method in bin i ;
- $c_{V,i}$ is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;
- $c_{T,i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;
- $c_{B,i}$ is the sensitivity factor for pressure in bin i ;
- $c_{RH,i}$ is the sensitivity factor for relative humidity in bin i .

This also gives

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i^2 (s_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 s_{SC,i}^2) + \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{M,i}^2} \right)^2 \right) \quad (\text{E.8})$$

In the above equation, the uncertainties due to the data acquisition system are part of the uncertainty of each measurement parameter.

The measured power curve, shown in Figure 6 and Table 4, is used in the uncertainty calculation in this annex. The results of the uncertainty analysis in the example are also shown in Figure 6, Table 4 and Table 5. All sensitivity factors are listed in Table E.10, and category B uncertainties are listed in Table E.11.

Table E.2 – List of category A and B uncertainties

Category B: Instruments	Note	Uncertainty	Sensitivity	Magnitude
Power output		$u_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$	
Current transformers	a	$u_{P,CT,i}$		0,75 %
Voltage transformers	a	$u_{P,VT,i}$		0,5 %
Power transducer or power measurement device	a	$u_{P,PT,i}$		0,5 %
DAQ (see E.4.2)	d	$u_{dP,i}$		0,1 % to 0,2 %
Wind speed		$u_{V,i}$		
Wind speed measurement		$u_{VHW,i}$		
Wind speed (cup or sonic)		$u_{VS,i}$		
Calibration	b	$u_{VS,precal,i}$	For the <i>AEP</i> uncertainty (and for the last bin of the power curve uncertainty) use:	From calibration
Post calibration / In-situ	b	$u_{VS,postcal,i}$		0,2 m/s
Classification	c	$u_{VS,class,i}$		1,0 %
Mounting effects			$c_{V,i} \approx \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}$	
Single top-mounted	d	$u_{VS,mnt,i}$		0,5 %
Side-by-side mounted	d	(same)	For the power curve uncertainty, use:	1,0 %
Side-mounted	d	(same)		1,5 %
Lightning finial	d	$u_{VS,igt,i}$	$c_{V,i} \approx \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(P_{i+1} - P_i)}{(V_{i+1} - V_i)} + \frac{(P_i - P_{i-1})}{(V_i - V_{i-1})} \right)$	0,1 % to 0,2 %
DAQ (see E.4.2)	d	$u_{dVS,i}$		0,1 % to 0,2 %
Wind speed (RSD)		$u_{VR,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Calibration	bc	$u_{VR,ver,i}$		2 % to 3 %
In-situ check	c	$u_{VR,isc,i}$		See E.7.3
Classification	c	$u_{VR,class,i}$		1,0 % to 1,5 %
Mounting	c	$u_{VR,mnt,i}$		0,1 %
Flow variation in different probe volumes at same height	d	$u_{VR,flow,i}$		2 % to 3 % see E.7.6
Monitoring test	c	$u_{VR,mon,i}$		0,5 %
Rotor equivalent wind speed		$u_{REWS,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Wind shear	c	$u_{REWS,shear,i}$		See E.8.2
Wind veer	c	$u_{REWS,veer,i}$		See E.8.3
Wind speed – Terrain effects		$u_{VT,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Without site calibration				
Flow distortion due to terrain	d	$u_{VT,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	2 % or 3 % (offshore 1 % or 2 %)
With site calibration				
Anemometer calibration	b	$u_{VT,precal,i}$		From calibration
Post calibration / In-situ	b	$u_{VT,postcal,i}$		0,2 m/s
Anemometer classification	c	$u_{VT,class}$		1,0 %
Mounting effects				
Single top-mounted	d	$u_{VT,mnt,i}$		0,5 %
Side-by-side mounted	d	(same)		1,0 %
Side-mounted	d	(same)		1,5 %
Lightning finial	d	$u_{VT,igt,i}$		0,1 % to 0,2 %

Category B: Instruments	Note	Uncertainty	Sensitivity	Magnitude
DAQ (see E.4.2)	d	$u_{dVT,i}$		0,1 % to 0,2 %
Change of correction (adjacent wind direction bins)	c	$u_{VT,coc,i}$		See E.9.8
Removal of wind direction sensor between site calibration and power curve measurement	c	$u_{VT,rmv,i}$		See E.9.9
Seasonal variation	c	$u_{VT,sv,i}$		See E.9.10
Air density		$u_{AD,i}$		
<u>Temperature</u>		$u_{T,i}$	$c_{T,i}$ (see E.10.2)	
Temperature sensor	ab	$u_{T,cal,i}$		0,4 K to 0,6 K
Radiation shielding	cd	$u_{T,shield,i}$		1,5 K to 2,5 K
Mounting effects	cd	$u_{T,mnt,i}$		0,25 K to 0,4 K
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dT,i}$		0,1 % to 0,2 %
<u>Air pressure</u>		$u_{B,i}$	$c_{B,i}$ (see E.10.7)	
Pressure sensor	ab	$u_{B,cal,i}$		2 hPa to 4 hPa
Mounting effects	a	$u_{B,mnt,i}$		10 % of correction
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dB,i}$		0,1 % to 0,2 %
<u>Relative Humidity</u>		$u_{RH,i}$	$c_{RH,i}$ (see E.10.11)	
Humidity sensor	ab	$u_{RH,cal,i}$		1 % to 2 % (RH)
Mounting effects	cd	$u_{RH,mnt,i}$		0,1 % to 0,2 %
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dRH,i}$		0,1 % to 0,2 %
<u>Method</u>	cd	$u_{AD,method,i}$	$c_{AD,method,I} = c_{V,i}$ (for actively regulated turbines) $c_{AD,method,I} = c_{V,i} = I$ (for stall regulated turbines)	0,2 % to 0,3 % on wind speed
Method		$u_{M,i}$	$c_{V,i}$ (see above)	
Wind conditions	d	$u_{M,wc,i}$		See E.11.2.1 bullet a) or b).
Wind conditions – wind shear	d	$u_{M,shear,i}$		See E.11.2.2
Wind conditions – wind veer	d	$u_{M,veer,i}$		See E.11.2.3
Wind conditions – upflow	d	$u_{M,upflow,i}$		See E.11.2.4
Wind conditions – turbulence	d	$u_{M,ti,i}$		0,3 % to 0,5 % (only for RSD with lower met mast) See E.11.2.5
Seasonal effects	d	$u_{M,sfx,i}$		0,7 % See E.11.3
Turbulence normalisation	d	$u_{M,tinorm,i}$		See E.11.4
Cold climate	d	$u_{M,cc,i}$		0,5 % to 1 %
Wind direction				
Wind direction vane / sonic		$u_{WV,i}$	None (see E.12.2.1)	
Calibration	b	$u_{WV,cal,i}$		See E.12.2.1
North mark	c	$u_{WV,nm,i}$		See E.12.2.2
Boom orientation	d	$u_{WV,bo,i}$		See E.12.2.3
Operation (influence of mast)	c	$u_{WV,oe,i}$		See E.12.2.4

Category B: Instruments	Note	Uncertainty	Sensitivity	Magnitude
Magnetic declination angle	c	$u_{WV,mda,i}$		See E.12.2.5
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dWV,i}$		See E.12.2.6
Wind direction (RSD)			None (see E.12.3)	
Verification	ab	$u_{WR,i}$ $u_{WR,ver,i}$		See E.12.3.1
Classification	c	$u_{WR,class,i}$		See L.4.4
Monitoring test	c	$u_{WR,mon,i}$		See E.12.3.2
Flow variation in different probe volumes at same height	c	$u_{WR,fv,i}$		See E.12.3.3
Alignment	d	$u_{WR,align,i}$		See E.12.3.4
Magnetic declination angle	c	$u_{WR,mda,i}$		See E.12.3.5
DAQ (see E.4.2)	c	$u_{dWR,i}$		See E.12.3.6
Category A: Statistical				
Electric power	e	$s_{P,I}$	$c_{P,i} = 1$	
Site calibration	e	s_{sc}	$c_{V,i}$ (see above)	
NOTE Identification of uncertainties: a = reference to standard; b = calibration; c = other "objective" method"; d = "guesstimate"; e = statistics.				

The ranges for the uncertainty components given in Table E.2 should be considered. Where available, actual values from specific measurements should be used. It should be noted that uncertainty components should not be estimated with a value of zero, as per guidance in the GUM, unless the specific uncertainty components are not relevant for the specific test methodology applied (see Clause E.14).

Also, it is important to note that the wind direction uncertainty does not influence directly the uncertainty of the power curve or the *AEP* (unless a wind veer normalisation is applied). However, the wind direction uncertainty is included here as it is important to understand how accurate the measurement sector filtering is being implemented as well as how accurate the site calibration factors are applied to data from the right sectors. As the wind direction uncertainty shall be reported, this table gives the minimum uncertainty components that shall be considered for the wind direction uncertainty. An estimate of the magnitude of these components is not given, but these should be included in a reported power curve.

Note that some calibration reports report an uncertainty for a coverage factor of two instead of one. In order to combine uncertainties correctly, the uncertainties should be converted to a coverage factor consistent with all uncertainty inputs (by default, use a coverage factor of 1).

E.3 Category A uncertainties

E.3.1 General

Category A uncertainties in measured and normalised electric power and due to climatic variations and the site calibration (if conducted) need to be considered.

E.3.2 Category A uncertainty in electric power

The standard deviation of the distribution of normalized power data in each bin is calculated by the equation:

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2} \quad (\text{E.9})$$

where

- $\sigma_{P,i}$ is the standard deviation of the normalized power data in bin i ;
- N_i is the number of 10 min data sets in bin i ;
- P_i is the normalized and averaged power output in bin i ;
- $P_{n,i,j}$ is the normalized power output of data set j in bin i .

The standard uncertainty of the normalized and averaged power in the bin is estimated by the equation:

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}} \quad (\text{E.10})$$

where

- $s_{P,i}$ is the category A standard uncertainty of power in bin i ;
- $\sigma_{P,i}$ is the standard deviation of the normalized power data in bin i ;
- N_i is the number of 10 min data sets in bin i .

E.3.3 Category A uncertainties in the site calibration

The residuals between the site calibration corrected and measured wind speed at the wind turbine meteorological mast are used to define the category A uncertainty of the site calibration, s_{SC} . Refer to C.6.1 for the method of derivation.

E.4 Category B uncertainties: Introduction and data acquisition system

E.4.1 Category B uncertainties: Introduction

The category B uncertainties are assumed to be related to the instruments, the data acquisition system, the terrain surrounding the power performance test site, the wind conditions and the uncertainty related to the applied method. If the uncertainties are expressed as uncertainty limits, or have implicit, non-unity coverage factors, the standard uncertainty shall be estimated or they shall be properly converted into standard uncertainties.

Consider an uncertainty expressed as an uncertainty limit $\pm U$. If a rectangular probability distribution is assumed, the standard uncertainty is:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (\text{E.11})$$

If a triangular probability distribution is assumed, the standard uncertainty is:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{6}} \quad (\text{E.12})$$

E.4.2 Category B uncertainties: data acquisition system

The uncertainties related to the data acquisition have been included under the treatment for the specific signals. The uncertainty of the electrical power includes a component for data acquisition and the same for wind speed and the other measured signals.

We assume in this annex the data acquisition system to have a standard uncertainty $u_{d,i}$ of 0,1 % of the full range of each measurement channel. However, for the reporting of a specific power performance test the data acquisition uncertainty shall be estimated for the specific test setup, including at least the contributions to the data acquisition uncertainty mentioned in E.4.2.

There may be uncertainties from transmission, signal conditioning, analogue to digital conversion, and data processing in the data acquisition system. The uncertainties may be different for each measurement channel. The standard uncertainty of the data acquisition system for the full range of a certain measurement channel, $u_{d,i}$, can be expressed as:

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d,ST,i}^2 + u_{d,SA,i}^2 + u_{d,SC,i}^2} \quad (\text{E.13})$$

where

$u_{d,ST,i}$ is the uncertainty due to signal transmission in bin i ;

$u_{d,SA,i}$ is the uncertainty due to system accuracy in bin i ;

$u_{d,SC,i}$ is the uncertainty due to signal conditioning in bin i .

Although the assumption of a standard uncertainty of 0,1 % of the full range of the measurement channel is reasonable in many cases, specific hardware and conditions can cause this to be much higher. In order to ensure that the uncertainty of the data acquisition system is indeed negligible compared to the uncertainty of the sensors (which as a guidance should be interpreted as a factor 10 in magnitude when comparing standard uncertainties) an assessment of the actual uncertainty of the data acquisition system used shall be done.

E.5 Category B uncertainties: Power output

E.5.1 General

The category B uncertainties regarding the power output are based on four different uncertainty components which are introduced here.

The symbol for this uncertainty component is $u_{P,i}$.

The uncertainty of the power measurement has uncertainty contributions from the current and voltage transformers and from the power transducer (or other power measurement device). Uncertainties of these subcomponents are normally stated by their classification.

Finally the uncertainty related to the data acquisition of the power signal shall be added.

E.5.2 Category B uncertainties: Power output – Current transformers

This uncertainty component covers the uncertainty due to the current transformer as covered by the classification of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{P,CT,i}$.

In this annex, the current transformers and the power transducer are all assumed to be of class 0,5 which is the minimum acceptable class for a power curve measurement as required by this standard.

The current transformers of class 0.5 (nominal loads of the current transformers are here designed to match the nominal power, 2 000 kW, and not 125 % of nominal power). They have uncertainty limits, referring to IEC 61689-2, of $\pm 0,5$ % of the current at 100 % load. At 20 % and 5 % loads, though, the uncertainty limits are increased to $\pm 0,75$ % and $\pm 1,5$ % of the current, respectively. For power performance measurements on wind turbines, the most important energy production is produced at a reduced power. Thus, we anticipate the uncertainty limits of $\pm 0,75$ % of the current at 20 % load to be a good average.

The uncertainty distribution for a current transformer is assumed to be rectangular. If current transformers are not operated within their secondary loop operational load limits, additional uncertainties shall be added.

It is assumed that the uncertainties of the three current transformers are caused by external influence factors such as air temperature, grid frequency, etc. They are therefore assumed fully correlated (an exception from the general assumption) and are summed linearly. As each current transformer contributes by one-third to the power measurement, it follows that the uncertainty of all current transformers is proportional to the power as follows:

$$u_{P,CT,i} = \frac{0,75 \% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \frac{1}{3} = 0,43 \% \cdot P_i [\text{kW}] \quad (\text{E.14})$$

E.5.3 Category B uncertainties: Power output – Voltage transformers

This uncertainty component covers the uncertainty due to the voltage transformer as covered by the classification of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{P,VT,i}$.

In this annex, the voltage transformers and the power transducer are all assumed to be of class 0.5, which is the minimum acceptable class for a power curve measurement as required by this standard.

The voltage transformers of class 0,5 have uncertainty limits, referring to IEC 61869-3, of $\pm 0,5$ % of the voltage at all loads. The uncertainty distribution is assumed to be rectangular.

Voltage transformers are not used in all measurements and the value for this uncertainty components may be set to zero when not used.

If the voltage transformers are not operated within their secondary loop operational load limits, additional uncertainties shall be added.

The grid voltage is normally rather constant and independent of the wind turbine power. The uncertainties of the three voltage transformers are as for the current transformers assumed to be caused by external influence factors such as air temperature, grid frequency, etc. They are therefore assumed fully correlated (an exception from the general assumption) and are summed linearly. As each voltage transformer contributes by one-third to the power measurement, it follows that the uncertainty of all voltage transformers is proportional to the power as follows:

$$u_{P,VT,i} = \frac{0,5 \% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \frac{1}{3} = 0,29 \% \cdot P_i [\text{kW}] \quad (\text{E.15})$$

E.5.4 Category B uncertainties: Power Output – Power transducer or other power measurement device

This uncertainty component covers the uncertainty due to the power transducer (or other power measurement device) as covered by the classification of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{P,PT,i}$.

The power transducer of class 0,5, referring to IEC 60688, with a nominal power of 2 500 kW (125 % of the nominal power, 2 000 kW, of the wind turbine) has an uncertainty limit of 12,5 kW. The uncertainty distribution is assumed to be rectangular.

The uncertainty of the power transducer is thus:

$$u_{P,PT,i} = \frac{12,5 \text{ kW}}{\sqrt{3}} = 7,2 \text{ kW} \quad (\text{E.16})$$

E.5.5 Category B uncertainties: Power output – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the power signal.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dP,i}$.

The magnitude of this component has an assumed default value of 0,1 % to 0,2 % of the full range of the data acquisition system.

Considering the electric power range of the measurement channel for a 2 MW turbine to be 3 000 kW and an uncertainty of the data acquisition system of 0,1 % of this range gives a resulting uncertainty of 3 kW.

E.6 Category B uncertainties: Wind speed – Introduction and sensors

E.6.1 Category B uncertainties: Wind speed – Introduction

The wind speed uncertainty consists of three components, each of which again consists of multiple subcomponents. These three components are:

- a) the uncertainty related to use of sensing hardware (cups, sonic and remote sensing devices (RSD));
- b) the uncertainty related to the flow distortion due to the terrain;
- c) the uncertainty related to the methods applied.

The symbol for this uncertainty component is $u_{V,i}$.

These uncertainty components as well as the sub-components will be introduced in the next subclauses.

The sensitivity factor, $c_{V,i}$, is defined in Table E.2.

E.6.2 Category B uncertainties: Wind speed – Hardware

The wind speed uncertainty related to hardware consists of three components, each of which again consists of multiple subcomponents. These three components are:

- a) The uncertainty related to use of sensors placed in a meteorological mast (cup anemometers and sonic anemometers);
- b) The uncertainty related to a remote sensing device (RSD);
- c) The uncertainty related to a rotor equivalent wind speed (REWS);

The symbol for this uncertainty component is $u_{VHW,I}$.

E.6.3 Category B uncertainties: Wind speed – Meteorological mast mounted sensors

E.6.3.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty related to the use of cup anemometers and sonic anemometers in meteorological masts (either top mounted or side mounted).

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,i}$. (V stands for wind speed and S stands for sensors).

This uncertainty component has six sub components:

- a) uncertainty related to the calibration of the sensor before start of the power performance test;
- b) uncertainty related to the calibration of the sensor during or after the power performance test;
- c) the uncertainty related to the operational characteristics as determined by the classification of the sensor;
- d) the uncertainty related to the mounting of the sensor;
- e) the uncertainty related to the mounting of the lightning finial;
- f) the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the sensor.

E.6.3.2 Category B uncertainties: Wind speed – Met mast sensors – Pre-calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to calibration of the sensor before the test. This includes the variability of repeated tests for one test facility as well as the variability of repeated tests between various facilities.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,precal,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex F of this standard.

For a specific power performance test, the values as indicated on the calibration for the sensors employed shall be used for the uncertainty calculation.

E.6.3.3 Category B uncertainties: Wind speed – Met mast sensors – Post-calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the in-situ calibration and/or the post-calibration of the sensor during and/or after the test.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS,postcal,i}$.

This uncertainty is also discussed in 7.2.2 and Annex K of this standard.

If both an in-situ calibration has been done during the power performance test as well as a post-calibration has been done after the power performance test, the magnitude for this uncertainty component shall be taken from the post-calibration.

If a post calibration is done, the magnitude of this uncertainty component shall be the maximum difference between the precalibration and post-calibration in the wind speed range of 4 m/s to 12 m/s, up to a maximum of 0,2 m/s.

Please note that due to the inherent uncertainty of the calibration the expectation will be that small differences will occur between the pre-calibration and post-calibration. The best estimate of the calibration value for a specific sensor will be the average of the calibrations done; in the limit of a very large amount of calibrations the average will converge towards the centre of the distribution.

As only the pre-calibration is used to determine the wind speed from the sensor, the maximum difference can therefore be used as an added uncertainty contribution.

If only an in-situ calibration is done according to Annex K, the magnitude of this uncertainty component shall be the maximum value of δ in the wind speed range of 4 m/s to 12 m/s, up to a maximum of 0,2 m/s.

E.6.3.4 Category B uncertainties: Wind speed – Met mast sensors – Classification

This uncertainty component covers the uncertainty related to the operational characteristics of the sensor as determined by the classification of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{V,S,class,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex I of this standard.

The magnitude of this uncertainty shall be taken from the classification report. Care shall be taken that the terrain type the sensor is used in matches the terrain type of the classification of the sensor (Class A, B or S).

A reference to the classification report shall be included in the power performance report.

The measured range of the influence parameters used for the classification as per Annex I shall be reported for the same data set used for the power performance report. If upflow is not measured, compliance with the accuracy class shall be argued from the local terrain slopes for the experienced wind directions by fitting a plane to the terrain within a distance of 5 times the measurement height relative to the position of the WME according to IEC 61400-1:2005, 11.9.

The operational uncertainty of the reference anemometer (from a possible site calibration) has to be included in this uncertainty component. This ranges from none, some or all of the reference anemometer uncertainty from the site calibration, depending on if the measured range of influence parameters experienced by the reference sensor on the permanent meteorological mast during the site calibration is significantly different from the range of influence parameters experienced by the reference sensor on the permanent meteorological mast during the power curve test.

By default half of the operational uncertainty of the reference anemometer and all of operational uncertainty of the turbine anemometer during the site calibration and half of the operational uncertainty of the anemometer during the power curve test shall be included. These shall be added using the root-sum-square approach.

E.6.3.5 Category B uncertainties: Wind speed – Met mast sensors – Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{V,S,mnt,i}$.

This uncertainty is also discussed in 7.2.4 and 9.1.2 as well as Annex G of this standard.

This uncertainty component has three default values corresponding to the three mounting arrangements allowed by Annex G (single top-mounted anemometer, side-by-side top-mounted anemometer or side-mounted anemometer).

For a single top-mounted anemometer, the default magnitude for this uncertainty component is 0,5 % of the measured wind speed.

For a side-by-side top-mounted anemometer, the default magnitude for this uncertainty component is 1,0 %.

For a side-mounted anemometer, the default magnitude for this uncertainty component is one the following:

- for not-flow-corrected signals the default magnitude for this uncertainty component is 1,5 % of the measured signal;
- for a flow-corrected signal according to 7.2.4 and 9.1.2 (mast flow distortion correction) the default magnitude for this uncertainty component is the root-sum-square of half the mean correction applied to the wind speed signal and 0,5 % of the measured signal. Wake effects shall be excluded for the correction to be applied.

The same correction principle can also be applied to two top-mounted anemometers in a goal-post configuration, with the same default magnitude for the flow-corrected signal.

E.6.3.6 Category B uncertainties: Wind speed – Met mast sensors – Lightning finial

This uncertainty component covers the uncertainty related to a possible top-mounted lightning finial and its influence on a top-mounted anemometer when the requirements in Clause G.5 for the mounting of the lightning finial cannot be met.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VS, \text{lgt}, i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the wind speed signal.

E.6.3.7 Category B uncertainties: Wind speed – Met mast sensors – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the wind speed signal.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dVS, i}$.

This uncertainty is also discussed in E.4.2 of this standard.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the full range of the measured wind speed signal.

Considering a wind speed range of 30 m/s of the measurement channel and an uncertainty of the data acquisition system of 0,1 % of this range, the standard uncertainty from data acquisition is 0,03 m/s.

E.7 Category B uncertainties: Wind speed – RSD

E.7.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty related to the use of remote sensing devices for wind speed measurements (LIDAR and SODAR).

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,i}$ (V stands for wind speed and R stands for remote sensing device).

This uncertainty component has six sub components:

- a) uncertainty related to the verification of the device;
- b) uncertainty related to the in-situ check of the device;
- c) the uncertainty related to the operational characteristics of the device as determined by the classification of the device;
- d) the uncertainty related to the mounting of the device;
- e) the uncertainty related to flow variation in different probe volumes at the same height;
- f) the uncertainty related to the monitoring test.

E.7.2 Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the calibration of the remote sensing device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,ver,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex L.

Prior to the measurement a calibration according to Annex L shall be undertaken and its uncertainties evaluated ($u_{VR,vrf,i}$) (for details refer to L.4.3). If the uncertainties for the exact measurement height are not available, the uncertainties are recommended to be interpolated. The default magnitude for this uncertainty component is 1,0 % to 3,0 % of the measured wind speed.

E.7.3 Category B uncertainties: Wind speed – RSD – in-situ check

This uncertainty component covers the uncertainty related to the verification of the remote sensing device, only applied for an RSD with a lower than hub height met-mast.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,isc,i}$ ("isc" stands for in-situ check).

This uncertainty is also discussed in Annex L of this standard.

The in-situ test shall be evaluated as described in Annex K, where the RSD is the main measurement and the anemometer on the monitoring mast is the control anemometer with the same uncertainty limits.

E.7.4 Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Classification

This uncertainty component covers the uncertainty related to the classification of the remote sensing device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,class,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex L of this standard.

The uncertainty due to the operational characteristics are coming from the classification report of the RSD which is providing slopes and ranges of environmental variables. There are three ways of calculating the uncertainty due to these variables:

1. The environmental variable is measured during the measurement:

(according to Equation (L.6) of Annex L)

$$u_{VR,class,i} = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot |\bar{x}_{PC,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}| \right)^2} \quad (E.17)$$

where

- v_i is the wind speed measured at height i ;
- M is number of environmental variables considered to have a relevant influence on the accuracy of the remote sensing device according to the classification test;
- m_j is slope describing the sensitivity of the wind speed measurement of the remote sensing device on the environmental variable j as gained from the combination of results from a minimum of 3 classification tests;
- $\bar{x}_{PC,j,i}$ is mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the power curve test;
- $\bar{x}_{ver,j,i}$ is mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the performance verification test of the remote sensing device.

2. The environmental variable is NOT measured during the measurement:

$$u_{VR,class,i} = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot \frac{\max(|x_{min,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}|, |x_{max,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}|)}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (E.18)$$

where

- v_i is the wind speed measured at height i ;
- M is number of environmental variables considered to have a relevant influence on the accuracy of the remote sensing device according to the classification test;
- m_j is slope describing the sensitivity of the wind speed measurement of the remote sensing device on the environmental variable j as gained from the combination of results from a minimum of 3 classification tests;
- $x_{min,j,i}$ is the expected lower range limit of not measured environmental variable j in wind speed bin i ;
- $x_{max,j,i}$ is the expected upper range limit of not measured environmental variable j in wind speed bin i ;
- $\bar{x}_{ver,j,i}$ is mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the performance verification test of the remote sensing device.

3. If a fixed range is expected:

$$u_{VR,class,i} = v_i \frac{\text{accuracy class}}{\sqrt{3}} \quad (E.19)$$

NOTE This equation is inaccurate because the variations of the environmental variable are already included in the uncertainties of cat. A of the power curve.

According to L.4.4, $u_{VR,class}$ becomes equal to zero if the verification test includes the same data as the power curve test.

For more details, see L.4.4 of Annex L.

The default magnitude for this uncertainty component is 1,0 % to 1,5 % of the measured wind speed.

E.7.5 Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the remote sensing device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,mnt,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex L of this standard.

The uncertainty of the remote sensing device due to non-ideal levelling of the device shall be estimated. The uncertainty is highly dependent on the type of instrument being used.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % of the measured wind speed.

E.7.6 Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Flow variation

This uncertainty component covers the uncertainty related to the flow variation across the measurement volume of the remote sensing device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,flow,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex L of this standard.

The user should consult with the remote sensing device manufacturer for the best method for evaluating the uncertainty for their specific device at the test site.

The following procedure is recommended for a standard use (according to Albers *et al.*, reference [12]²⁵):

$$u_{VR,flow,i} = \frac{(\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)) \cdot v_i}{2 \cdot \tan(\phi)} \quad (E.20)$$

α_1 is the upflow angle into the probe volume;

α_2 is the upflow angle out of the probe volume;

ϕ is the opening angle of the RSD from the vertical.

As a first estimation for the upflow angles into and out of the probe volume, 1° and –1° respectively, may be used.

²⁵ Figures in square brackets refer to the bibliography.

This default first estimate results in an uncertainty component of 2 % to 3 % of the measured wind speed (depending on the RSD opening angle), as per L.4.5. Alternatively the method referenced in E.6.3.4 based on terrain slope may be used.

E.7.7 Category B uncertainties: Wind speed – RSD – Monitoring test

This uncertainty component covers the uncertainty related to the result of the monitoring of the remote sensing device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VR,mon,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex L.

Three scenarios are possible and shall be treated as follows:

1. No additional uncertainty needs to be added if the following criterion is met:

$$\sqrt{u_{VRvf,mh,i}^2 + u_{VRcls,mh,i}^2} > |v_{RSD,mh,i} - v_{MM,i}| \quad (E.21)$$

$u_{VRvf,mh,i}$ is the uncertainty of the RSD verification at control mast height in bin i ;

$u_{VRcls,mh,i}$ is the uncertainty due to operational characteristics of the RSD at control mast height in bin i ;

$v_{RSD,mh,i}$ is the wind speed of the RSD at control mast height in bin i ;

$v_{MM,i}$ is the wind speed of the control mast in bin i

2. If Equation (E.21) is not met and the measurement height of the RSD and the control met mast are equal, the following uncertainty shall be added:

$$u_{VRmon,i} = |v_{RSD,mh,i} - v_{MM,i}| - \sqrt{u_{VRvf,mh,i}^2 + u_{VRcls,mh,i}^2} \quad (E.22)$$

3. If Equation (E.21) is not met and the measurement heights of the RSD and the control met mast are not the same, $u_{VRmon,i}$ shall be calculated as follows:

$$u_{added\_systematic,j,i} = u_{added\_systematic,1,i} \frac{u_{systematic,j,i}}{u_{systematic,1,i}} \quad (E.23)$$

where

$u_{added\_systematic,j,i}$ is added category B standard uncertainty at measurement height j (not covered by the meteorological mast);

$u_{added\_systematic,1,i}$ is added category B uncertainty at the height of the top of the meteorological mast;

$u_{systematic,j,i}$ is cumulated other category B uncertainties of the remote sensing device at height j ;

$u_{systematic,1,i}$ is cumulated other category B uncertainties of the remote sensing device at the height of the top of the meteorological mast.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,5 % of the measured wind speed.

E.8 Category B uncertainties: Wind speed – REWS

E.8.1 General

A number of uncertainty components are not related to the wind speed measurement (at least not when applied to a hub height wind speed) but to the use and definition of the rotor equivalent wind speed (REWS). The uncertainty components related to REWS will be covered in this subclause.

The rotor equivalent wind speed according to Equation (5) in 9.1.3.2 includes wind speed measurements at different heights above ground. In order to make uncertainty calculations of the rotor equivalent wind speed feasible, Equations (E.3) and (E.4) are needed. Equation (E.3) and (E.4) are approximations of (E.1) and (E.2) respectively for the case that the category B uncertainty components are independent between different category B uncertainty sources. This approximation is highly violated if uncertainties of wind speed measurements at different height levels are considered as separate category B uncertainties, because the uncertainty components of wind speed measurements at different height levels are well correlated. Thus, Equations (E.3) and (E.4) cannot be applied directly.

In order to overcome this problem, Equations (E.3) and (E.4) shall be applied with such category B components of the rotor equivalent wind speed which can be considered as independent from each other. Subclause E.8.2 provides advice how this can be implemented.

E.8.2 Category B uncertainties: Wind speed – REWS – Wind speed measurement over whole rotor

E.8.2.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty of the REWS wind speed based on the multiple wind speed measurements the REWS is based on.

The symbol for this uncertainty component is $u_{\text{REWS, shear}, i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex P of this standard.

NOTE This uncertainty will be used instead of $u_{V, i}$ in conjunction with E.13.3.

What is very important for this uncertainty component is that the derivation and hence the magnitude is strongly dependent on the various measurement methods as introduced in 7.2. A configuration with a hub-height only meteorological mast will not lead to a REWS implementation, the other measurement configurations are considered in the subclauses below.

Please note that the same symbol is used in each subclause as these configurations are mutually exclusive and depending on the specific measurement setup only one of subclauses E.8.2.2 to E.8.2.4 applies.

E.8.2.2 REWS shear uncertainty – Meteorological mast significantly above hub height

In this configuration the REWS is based on signals from side-mounted cup anemometers or sonic anemometers from multiple measurement heights on a meteorological mast.

In this case Equation (5) in 9.1.3.2 applies and the REWS uncertainty components come from Clause E.6.

The default values come from the combination of the default values in Clause E.6.

The way to combine these components into a REWS uncertainty is explained in E.13.7.

E.8.2.3 REWS shear uncertainty – RSD + lower-than-hub-height meteorological mast

In this configuration, the REWS is based on signals from an RSD. The data from the meteorological mast is only used to validate the RSD data.

In this case, Equation (5) in 9.1.3.2 applies and the REWS uncertainty components come from Clause E.7.

The default values come from the combination of the default values in Clause E.7.

The way to combine these components into a REWS uncertainty is explained in E.13.7.

E.8.2.4 REWS shear uncertainty – hub height meteorological mast + RSD for shear

In this configuration, the REWS is based on a cup anemometer or sonic anemometer on a hub-height meteorological mast combined with shear data from an RSD.

In this case, Equation (11) in 9.1.3.4 applies and the REWS uncertainty components come from both Clause E.6 as well as Clause E.7.

In this case, we still have a further division: either the RSD signals are considered as absolute wind speed measurements or as relative wind speed measurements, as the treatment is different between these. This depends on the type of equipment used or the available sensitivity & verification test.

For an absolute wind speed the way to combine these components into a REWS uncertainty is explained in E.13.8.

For a relative wind speed the way to combine these components into a REWS uncertainty is explained in E.13.9.

E.8.3 Category B uncertainties: Wind speed – REWS – Wind veer

This uncertainty component covers the uncertainty related to the influence of veer on the Rotor Equivalent Wind Speed.

The symbol for this uncertainty component is $u_{\text{REWS,veer},i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex Q of this standard.

The veer measurement is based on signals from side-mounted wind vanes or sonic anemometers from multiple measurement heights on a meteorological mast or on signals from an RSD.

The sub-components for this uncertainty component therefore come from E.12.2 or from E.12.3.

E.9 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain

E.9.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty related to the flow distortion of the wind speed between measurement point and wind turbine due to the local terrain.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,i}$ (V stands for wind speed and T stands for Terrain).

This uncertainty is also discussed in 6.3.4 of this standard.

When the power performance test is done without a site calibration, the default magnitude of this uncertainty component is determined by the distance between the measurement device and the turbine under test. If this distance is between 2 and 3 rotor diameters ($2D \leq \text{distance} \leq 3D$), this default magnitude is 2 % of the measured wind speed for onshore flat terrain and 1 % for offshore. If this distance is between 3 and 4 rotor diameters ($3D < \text{distance} \leq 4D$), this default magnitude is 3 % of the measured wind speed for onshore flat terrain and 2 % offshore.

When the power curve test is done with a site calibration, the default magnitude of this uncertainty component is determined by the site calibration measurement.

In this case, this uncertainty component related to the terrain has nine sub components:

- a) uncertainty related to the calibration of the anemometers used for the site calibration;
- b) uncertainty related to the operational characteristics of the anemometers used for the site calibration;
- c) the uncertainty related to the mounting of the anemometers used for the site calibration;
- d) the uncertainty related to the data acquisition of the signals from the anemometers used for the site calibration;
- e) the uncertainty related to the lightning finial;
- f) the uncertainty related to the convergence check (refer to C.7.1);
- g) the uncertainty related to the correlation check (refer to C.7.2);
- h) the uncertainty related to the change in correction between adjacent bins;
- i) the uncertainty related to the removal of the wind direction sensor between site calibration and power curve measurement;
- j) the uncertainty related to seasonal variation.

E.9.2 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Pre-calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the calibration of the sensors before the site calibration test.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,precal,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause C.6 of this standard.

This uncertainty is virtually the same as $u_{VS,precal,i}$ with the difference that here it is applied to measured wind speeds on two masts.

If the reference anemometer is not exchanged between site calibration and the power curve test, its calibration uncertainty cancels out completely. Only the turbine mast anemometer calibration uncertainty is then relevant. If the reference anemometer is exchanged between site calibration and the power curve test for an anemometer calibrated in the same wind tunnel as used for the calibration of the first anemometer, a big part of the calibration of the reference anemometers cancels out, if the wind tunnel gives highly reproducible results. If the reference anemometer is exchanged between site calibration and power curve test for an anemometer calibrated in a different wind tunnel to that used for the calibration of the first anemometer, the uncertainty of both anemometer calibrations is relevant.

E.9.3 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Post-calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the in-situ calibration and/or the post-calibration of the sensor during and/or after the site calibration.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,postcal,i}$.

This uncertainty is also discussed in 7.2.2 and Annex K of this standard.

If both an in-situ calibration has been done during the power performance test as well as a post-calibration has been done after the power performance test, the magnitude for this uncertainty component shall be taken from the post-calibration.

If a post calibration is done, the magnitude of this uncertainty component shall be the maximum difference between the precalibration and post-calibration in the wind speed range of 4 m/s to 12 m/s, up to a maximum of 0,2 m/s.

Note that due to the inherent uncertainty of the calibration, the expectation will be that small differences will occur between the pre-calibration and post-calibration. The best estimate of the calibration value for a specific sensor will be the average of the calibrations done; in the limit of a very large amount of calibrations, the average will converge towards the centre of the distribution.

As only the pre-calibration is used to determine the wind speed from the sensor, the maximum difference can therefore be used as an added uncertainty contribution.

If only an in-situ calibration is done according to Annex K, the magnitude of this uncertainty component shall be the maximum value of δ in the wind speed range of 4 m/s to 12 m/s, up to a maximum of 0,2 m/s.

E.9.4 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Classification

This uncertainty component covers the uncertainty related to the classification of the sensors for the site calibration.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,class,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause C.6 of this standard.

This uncertainty is virtually the same as $u_{VS,class,i}$ with the difference that here it is applied to a measurement of wind speeds on two masts. Some of the influence factors for the classification will be experienced in the same way by both sensors, causing a correlation in the operational response and a reduction in the difference between the signals. But major influence factors such as turbulence, shear and upflow may be different between the two measurement locations and as such the magnitude of this uncertainty component shall be set to equal the uncertainty related to the classification of one sensor.

The magnitude of this uncertainty shall be taken from the classification report. Care shall be taken that the terrain type the sensor is used in matches the terrain type of the classification of the sensor (Class A, B or S).

A reference to the classification report shall be included in the site calibration report. If no such reference is included, the default magnitude for the uncertainty shall be a class 3,4A (for non-complex terrain) or a class 4,5B (for complex terrain).

The measured range of the influence parameters used for the classification as per Annex I shall be reported for the same data set used for the site calibration report. If upflow is not measured, compliance with the accuracy class shall be argued from the local terrain slopes for the experienced wind directions, assuming that the vertical angle of the wind is 2/3 of the average terrain slope within 5D of the turbine upwind of the turbine.

If the measured range of influence parameters experienced by the reference sensor on the permanent meteorological mast during the site calibration is significantly different from the range of influence parameters experienced by the reference sensor on the permanent meteorological mast during the power curve test, an additional uncertainty addition may be required. However, as long as both tests stay within the ranges defined for class A and B, this is considered to be sufficiently covered and no additional uncertainty needs to be taken into account.

E.9.5 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the sensors during the site calibration.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,mnt,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause C.6 of this standard.

This uncertainty is virtually the same as $u_{VS,mnt,i}$ with the difference that here it is applied to a measurement of wind speeds on two masts. In case the sensors are of the same type, the mast layout is the same and the wind direction is the same, one could assume that a high correlation exists between the mounting influences from both masts on both sensors which would be grounds for a reduced uncertainty. However, even with the same sensor type and mast layout often the wind direction that is experienced simultaneously on both masts will not be the same. As the influence from the mast on the sensors is directionally sensitive, the actual correlation of mounting effects between both masts will be limited and the mounting effects need to be taken into account.

The default magnitude for this uncertainty component is:

- a) 0,5 % of the measured wind speed for a single top-mounted anemometer;
- b) 1,0 % for a setup with side-by-side top-mounted anemometers;
- c) for a side-mounted anemometer, the default magnitude for this uncertainty component is one of the following:
 - 1) for not-flow-corrected signals the default magnitude for this uncertainty component is 1,5 % of the measured signal;
 - 2) for a flow-corrected signal according to 7.2.4 and 9.1.2, the default magnitude for this uncertainty component is the root-sum-square of half the mean correction applied to the wind speed signal and 0,5 % of the measured signal. Wake effects shall be excluded for the correction to be applied. This is in lieu of the not-flow-corrected uncertainty and shall not be added to it.

The same correction principle can also be applied to two top-mounted anemometers in a goal-post configuration, with the same default magnitude for the flow-corrected signal.

E.9.6 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Lightning finial

This uncertainty component covers the uncertainty related to a possible top-mounted lightning finial and its influence on a top-mounted anemometer when the requirements in Clause G.5 for the mounting of the lightning finial cannot be met.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,lgt,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the wind speed signal.

E.9.7 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signals of the wind speed sensors during the site calibration.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dVT,i}$.

This uncertainty is also discussed in Clause C.6 of this standard.

This uncertainty is virtually the same as $u_{dVS,i}$ with the difference that here it is applied to a measurement of wind speeds on two masts. As the data acquisition of both signals is assumed independent, this uncertainty needs to be counted twice.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the full range of the wind speed measurement channel.

E.9.8 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Change in correction between adjacent bins

This uncertainty component covers the uncertainty related to the change in correction between adjacent bins.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,COG,i}$ (COC stands for 'change in correction').

Refer to C.7.3 for details of the evaluation of this uncertainty.

E.9.9 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Removal of WD sensor

This uncertainty component covers the uncertainty related to removal of the wind direction sensor between the site calibration and the power performance test.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,rmv,i}$.

Refer to C.7.4 for details of the evaluation of this uncertainty.

E.9.10 Category B uncertainties: Wind speed – Terrain – Seasonal variation

This uncertainty component covers the uncertainty related to seasonal variation between the site calibration and the power performance test.

The symbol for this uncertainty component is $u_{VT,SV,i}$ (SV stands for seasonal variation).

This uncertainty is also discussed in C.7.5 of this standard.

This uncertainty shall only be applied if any of these conditions for a wind direction bin differs between site calibration and power performance test by more than the following amounts:

- a) 0,05 for wind shear exponent
- b) 3 % for turbulence intensity,
- c) if upflow is measured, a limit of $\pm 2^\circ$ change in vertical upflow is recommended.

If one or more of these conditions is triggered, then the default magnitude for this uncertainty is one third of the magnitude of the site calibration flow correction.

E.10 Category B uncertainties: Air density

E.10.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty related to the influence of air density on the power curve.

The symbol for this uncertainty component is $u_{AD,i}$.

The air density is derived from measurements of the air temperature, the humidity and the air pressure.

The air density uncertainty consists of four components:

- the uncertainty related to the use of a temperature sensor and the data acquisition;
- the uncertainty related to the use of a pressure sensor and the data acquisition;
- the uncertainty related to the use of a relative humidity (RH) sensors and the data acquisition, or the lack of such a sensor;
- the uncertainty due to the air density correction.

These uncertainty components as well as the subcomponents will be introduced in Clause E.10.

E.10.2 Category B uncertainties: Air density – Temperature introduction

This uncertainty component covers the uncertainty related to the measurement of the temperature.

The symbol for this uncertainty component is $u_{T,i}$.

This uncertainty component has four sub-components:

- a) uncertainty related to the calibration of the temperature sensor;
- b) uncertainty related to the radiation shielding of the temperature sensor;
- c) uncertainty related to the mounting of the temperature sensor;
- d) uncertainty related to the data acquisition of the signal from the temperature sensor.

The equations for the sensitivity factors for temperature are:

Sensitivity for temperature for a measurement on wind turbine with active power control:

$$c_{T,i} = -\frac{c_{v,i}v_i}{3\rho_i} \left(\frac{\rho_i}{T_i} + \frac{\phi_i}{T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846T_i) \right) \quad (\text{E.24})$$

where

- $c_{T,i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;
- $c_{v,i}$ is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;
- v_i is the average wind speed in bin i ;
- ρ_i is the average air density in bin i ;
- T_i is the average temperature in bin i ;
- ϕ_i is the average relative humidity (range 0 % to 100 %) in bin i ;
- R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK];

R_w is the gas constant of water vapour 461,5 [J/kgK].

Sensitivity for temperature for a measurement on a stall regulated wind turbine:

$$c_{T,i} = \frac{P_i}{\rho_i} \left(\frac{\rho_i}{T_i} + \frac{\phi_i}{T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \cdot 0,0000205 \cdot 0,0631846 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T_i) \right) \quad (\text{E.25})$$

where

$c_{T,i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;

P_i is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;

ρ_i is the average air density in bin i ;

T_i is the average temperature in bin i ;

ϕ_i is the average relative humidity (range 0 % to 100 %) in bin i ;

R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK];

R_w is the gas constant of water vapour 461,5 [J/kgK].

E.10.3 Category B uncertainties: Air density – Temperature – Calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to calibration of the temperature sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{T,\text{cal},i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,4 °C to 0,6 °C.

E.10.4 Category B uncertainties: Air density – Temperature – Radiation shielding

This uncertainty component covers the uncertainty related to the radiation shielding of the temperature sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{T,\text{shield},i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 1,5 °C to 2,5 °C.

E.10.5 Category B uncertainties: Air density – Temperature – Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the temperature sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{T,\text{mnt},i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,25 °C to 0,4 °C.

E.10.6 Category B uncertainties: Air density – Temperature – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signal of the temperature sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dT,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the full range of the measurement channel. With an assumed temperature range of 40 °C this comes to 0,04 °C.

E.10.7 Category B uncertainties: Air density – Pressure introduction

This uncertainty component covers the uncertainty related to the measurement of the pressure.

The symbol for this uncertainty component is $u_{B,i}$.

This uncertainty component has three sub-components:

- a) uncertainty related to the calibration of the pressure sensor;
- b) uncertainty related to the mounting of the pressure sensor;
- c) uncertainty related to the data acquisition of the signal from the pressure sensor.

The equation for the sensitivity factors for pressure are:

Sensitivity for pressure for a measurement on wind turbine with active power control:

$$c_{B,i} = \frac{c_{V,i} v_i}{3 \rho_i T_i R_0} \quad (\text{E.26})$$

where

- $c_{B,i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;
- $c_{v,i}$ is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;
- v_i is the average wind speed in bin i ;
- ρ_i is the is the average air density in bin i ;
- T_i is the average temperature in bin i ;
- R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK].

Sensitivity for pressure for a measurement on a stall regulated wind turbine

$$c_{B,i} = -\frac{P_i}{\rho_i T_i R_0} \quad (\text{E.27})$$

where

- $c_{B,i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;
- P_i is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;
- ρ_i is the is the average air density in bin i ;
- T_i is the average temperature in bin i ;
- R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK].

E.10.8 Category B uncertainties: Air density – Pressure – Calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the calibration of the pressure sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{B,cal,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 2 hPa to 4 hPa.

E.10.9 Category B uncertainties: Air density – Pressure – Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the pressure sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{B, \text{mnt}, i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is determined by the height difference for which the signal from the pressure sensor is corrected. Using ISO 2533 the pressure related to this height difference can be calculated. The default magnitude for the uncertainty related to this pressure correction is 10 % of the correction.

For a sensor installed at a height of 2 m and a hub height of 100 m, the difference is 98 m which gives a pressure difference of 11,7 hPa. The uncertainty would then be 1,17 hPa.

E.10.10 Category B uncertainties: Air density – Pressure – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signal of the pressure sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dB, i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % of the full range of the measurement channel for pressure. Considering a pressure range of 100 hPa of the measurement channel this gives 0,1 hPa.

E.10.11 Category B uncertainties: Air density – Relative humidity introduction

This uncertainty component covers the uncertainty related to the measurement of the relative humidity.

The symbol for this uncertainty component is $u_{RH, i}$.

The relative humidity is not required to be measured. In that case, a default value of 50 % shall be assumed with an uncertainty of 100 % (from 0 % to 100 %).

In case the humidity is measured, this uncertainty component has three sub-components:

- a) uncertainty related to the calibration of the humidity sensor;
- b) uncertainty related to the mounting of the humidity sensor;
- c) uncertainty related to the data acquisition of the signal from the humidity sensor;

The equations for the sensitivity factors for relative humidity are:

Sensitivity for relative humidity for a measurement on wind turbine with active power control:

$$c_{RH, i} = -\frac{c_{v, i} v_i}{3 \rho_i T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \cdot 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T_i) \quad (\text{E.28})$$

where

- $c_{RH, i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;
- $c_{v, i}$ is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;
- v_i is the average wind speed in bin i ;
- ρ_i is the average air density in bin i ;
- T_i is the average temperature in bin i ;

R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK];

R_w is the gas constant of water vapour 461,5 [J/kgK].

Sensitivity for relative humidity for a measurement on a stall regulated wind turbine

$$c_{RH,i} = \frac{P_i}{\rho_i T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \cdot 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T_i) \quad (E.29)$$

where

$c_{RH,i}$ is the sensitivity factor for temperature in bin i ;

P_i is the sensitivity factor for wind speed in bin i ;

ρ_i is the average air density in bin i ;

T_i is the average temperature in bin i ;

R_0 is the gas constant of dry air 287,05 [J/kgK];

R_w is the gas constant of water vapour 461,5 [J/kgK].

E.10.12 Category B uncertainties: Air density – Relative humidity – Calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the calibration of the humidity sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{RH,cal,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 1 % to 2 %.

E.10.13 Category B uncertainties: Air density – Relative humidity – Mounting

This uncertainty component covers the uncertainty related to the mounting of the humidity sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{RH,mnt,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % to 0,2 % of the measured value.

E.10.14 Category B uncertainties: Air Density – Relative humidity – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the humidity sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dRH,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component is 0,1 % of the full range of the measurement channel for relative humidity.

E.10.15 Category B uncertainties: Air density – Correction

This uncertainty component covers the uncertainty related to the air density correction.

The symbol for this uncertainty component is $u_{AD,method,i}$.

As part of the data analysis, a normalisation from measured air density to a reference air density is performed. This normalisation is related to an uncertainty component, in part because of the uncertainties in the measured temperature, pressure and relative humidity but

also because one of the underlying assumptions upon which the normalisation formula is based is increasingly inaccurate the larger the air density difference is on which the air density normalisation is applied.

For a stall-regulated wind turbine with constant pitch and constant rotational speed, this uncertainty shall be evaluated by bin averaging the air density normalised power output and the measured power output against the wind speed at hub height. Half of the deviation of the normalised and measured power output per wind speed bin shall be considered as the standard uncertainty of the air density normalisation in that wind speed bin.

For a wind turbine with active power control, the uncertainty of the air density normalisation shall be evaluated by bin averaging the measured wind speed against the wind speed normalised for the air density. Half of the deviation of the normalised and measured wind speed shall be considered as the standard uncertainty of the air density normalisation in that wind speed bin.

In this example using a wind turbine with active power control, the wind speed deviations per wind speed bin are listed in Table E.9.

E.11 Category B uncertainties: Method

E.11.1 General

The specific method used to measure or analyse a power curve can also contribute to the uncertainty of the result. As much as possible these have been included with the category B uncertainties they are related to. Therefore the uncertainty related to the air density correction is included under air density and the uncertainty related to the flow distortion correction is included under the wind speed sensors.

However, some of the uncertainties related to the method cannot easily be attributed to a specific component and these have been grouped under the header 'Method'.

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,i}$.

E.11.2 Category B uncertainties: Method – Wind conditions

E.11.2.1 General

Although this uncertainty is not directly discussed elsewhere in this standard, it is strongly related to the definition of the power curve as given in Clause 5 of this standard.

As per the definition the power curve according to this standard is a climate specific power curve. The wind conditions in terms of wind shear, wind veer, turbulence and upflow have a direct influence upon the power performance of a wind turbine.

As an example, let's assume that a power curve is measured for a specific set of wind conditions, namely shear = 0,1; wind veer is 10°, turbulence is 10 % and upflow is +2°. The measured power curve would then be reported together with these values and no further uncertainty needs to be introduced.

However, mostly we will not experience constant values for these parameters during a power curve measurement and during the power curve measurement each of these parameters will reflect a range of values that the turbine has been subjected to. As part of this example, let's assume that shear ranges from 0 to 0,3, wind veer from 0° to 20°, turbulence from 3 % to 20 % and upflow from 0° to 5°. As the measurement progresses, we are in fact sampling from many different power curves. As we have no control over these input variables, the next power curve measurement at the same site (be it immediately after the first measurement or a year later to catch the same part of the annual season) will be somewhat different from the

first power curve measured. This is the basic argument for adding an uncertainty component related to the wind conditions.

From this perspective, we have the following considerations:

- a) If one or more of the four parameters that determine the wind conditions have not been measured, the power curve cannot be reported accurately. The uncertainty related to this can only be estimated by assuming possible values and ranges for the missing parameters and estimating the potential influence on the power performance of the turbine.
- b) For the parameters that have been measured more information is available, but not necessarily all information sufficient to characterise the power performance in detail. For example:
 - A parameter measured on three points across the rotor may still not give a full picture for the areas that have not been measured.
 - The wind conditions (e.g. shear) are measured two to four rotor diameters away from the turbine and in most cases without further data to which extent the conditions at the measurement location reflects the conditions at the turbine location. Note that the uncertainty of the hub height wind speed correlation is considered in E.9.1.
 - A similar argument goes for the horizontal dimension of the rotor; the measurement to a large extent only characterises the changes of these parameters with height (if even that) but not the horizontal variability of the measured parameters.

In the light of these arguments a practical approach has been adopted. For nine or more measurement heights for one of these parameters, the assumption has been made that no further uncertainty needs to be added. For fewer measurement heights, an additional increase in uncertainty will be added.

This means that some of the above points are not addressed at all in the current uncertainty analysis; this will be incorporated in a future revision of this standard once sufficient details have been clarified to do so.

- c) If one or more of these parameters have been measured, it may be possible to normalise the power curve using this information, as explained in Annex M, Annex P and Annex Q.

The uncertainties related to points a) and b) are covered in this subclause, whereas the uncertainty related to the normalisations is covered further down.

Many of the influences here will be expressed as an uncertainty on wind speed. The experience values that the default estimates are based on are often expressed in terms of *AEP*. As a practical approach, the choice has been made to express this as an uncertainty through wind speed.

E.11.2.2 Category B uncertainties: Method – Wind conditions – Shear

E.11.2.2.1 General

The symbol for this uncertainty component is $u_{M, \text{shear}, i}$.

The default magnitude for this uncertainty component can be found in the two subclauses below.

E.11.2.2.2 Half rotor wind shear measurement coverage

This uncertainty estimation applies to a power curve with a hub height wind speed definition and without Annex P normalization. As wind turbine power curves are influenced by wind shear, the uncertainty of the measured power curve due to wind shear shall be conservatively estimated and taken into account even if no wind shear measurement is performed. For this, a wind shear correction factor according to Equation (9) and (10) in 9.1.3.3 shall be calculated under the following assumptions:

- a) Assuming 20 virtual wind speed measurements equally distributed over the rotor height range, resulting in 20 weighting factors.
- b) Assuming one power law for the lower rotor half and another power law for the upper rotor half. Based on these power laws, the wind speed relative to hub height shall be calculated for each virtual measurement height. The wind shear exponent applied for the lower rotor half shall be determined from the measurements for each 10 minute data point. The wind shear exponent for the upper rotor half shall be assumed to be half the value used for the lower rotor half. In case of negative shear values, also half of these values shall be assumed for the upper rotor half.

The standard uncertainty of the measured power curve in terms of the wind speed due to not measuring the wind shear shall be assumed for the i -th wind speed bin as:

$$u_{M, \text{shear}, i} = \frac{1}{\sqrt{3}} |f_r - 1| v_{h, i} \quad (\text{E.30})$$

where

f_r is the wind shear correction factor as calculated in 9.1.3.3;

$v_{h, i}$ is the wind speed at hub height in bin i .

Examples of estimated standard uncertainties of power curve measurements in terms of the wind speed due to the absence of wind shear measurements are shown in Table E.3. The respective uncertainty increases with the rotor diameter and decreases with the hub height.

Table E.3 – Example of standard uncertainties due to absence of a wind shear measurement

H	D	$u_{M, \text{shear}, i} / v_H$
[m]	[m]	[%]
60	60	3,0
60	80	3,9
100	80	2,4
120	80	2,0
100	120	3,5
150	120	2,4
Wind shear exponents of 0,5 and 0 have been assumed for the lower and upper rotor half, respectively.		

E.11.2.2.3 Full rotor wind shear measurement coverage

This uncertainty estimation applies to:

- a) a power curve with a rotor equivalent wind speed definition;
- b) a hub height wind speed power curve to which the normalization in Annex P is applied.

The calculation of the rotor equivalent wind speed according to Equation (5) in 9.1.3.2 assumes a constant wind speed for each measurement height. This assumption leads to an uncertainty of the evaluation of the rotor equivalent wind speed. This uncertainty shall be estimated by fitting a power law through each pair of wind speed measurements of successive measurement heights (z_m). The wind speed according to this power law shall be calculated for at least 10 height levels equally distributed between each pair of measurement heights. The summation according to Equation (5) shall be repeated with all height levels covered by the power law assumption and measurement heights. The percentage deviation of the resulting rotor equivalent wind speed compared to the rotor equivalent wind speed using only the

measured wind speeds shall be assumed as the (percentage) standard uncertainty of the wind speed due to the limited number of measurement heights.

The estimation of the standard uncertainty due to the limited number of measurement heights shall be performed on the basis of the bin averages of the wind speed measurements at the different height levels as function of the wind speed finally applied for the power curve evaluation.

NOTE The 10-min data sets are necessary for the calculation.

E.11.2.3 Category B uncertainties: Method – Wind conditions – Wind veer

E.11.2.3.1 General

This uncertainty component covers the uncertainty related to fewer than nine measurement heights for wind veer.

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,veer,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component can be determined using the three subclauses below.

E.11.2.3.2 No veer measurement

A wind veer correction factor according to Equation (Q.1) shall be calculated under the following assumptions:

- a) Assuming wind speeds to be equal to 1 at all measurement heights. Then Equation (Q.1) transforms to a wind veer correction factor.
- b) Assuming 20 virtual wind direction measurements equally distributed over the rotor height range, resulting in 20 weighting factors.
- c) Assuming homogenous wind veer over the entire rotor height range as large as can be reasonably expected for the test site. If no reasonable assumptions about extreme wind veer are possible for the test site, a wind veer of 40°/100 m shall be assumed.

The standard uncertainty of the measured power curve in terms of the wind speed due to not measuring the wind veer shall be assumed for the i -th wind speed bin as:

$$u_{M,veer,i} = \frac{1}{\sqrt{3}} |f_r - 1| v_{h,i} \quad (\text{E.31})$$

where

f_r is the wind veer correction factor as calculated above;

$v_{h,i}$ is the wind speed at hub height in bin i .

Examples of power curve measurement estimated standard uncertainties in terms of the wind speed due to the absence of wind veer measurements are shown in Table E.4. The respective uncertainty increases with the rotor diameter.

Table E.4 – Example of standard uncertainties due to absence of a wind veer measurement

D	$U_{M,veer}/v_h$
[m]	[%]
20	0,04
40	0,1
60	0,3
80	0,6
100	0,9
120	1,2
140	1,7
160	2,1
180	2,7
200	3,2
An extreme wind veer of 40°/100 m has been assumed for the calculations.	

E.11.2.3.3 Half rotor veer measurement

The calculation of the rotor equivalent wind speed according to Equation (Q.1) assumes a constant wind direction for each measurement height. This assumption leads to an uncertainty of the evaluation of the rotor equivalent wind speed.

The uncertainty related to a veer measurement across half a rotor shall be estimated using the same procedure as used for the veer across a full rotor (see E.11.2.3.4), with the change that the wind veer across the full rotor is 2,5 times that measured across the half rotor.

E.11.2.3.4 Full rotor veer measurement

The calculation of the rotor equivalent wind speed according to Equation (Q.1) assumes a constant wind direction for each measurement height. This assumption leads to an uncertainty of the evaluation of the rotor equivalent wind speed. This uncertainty shall be estimated by assuming a linear increase of the wind veer between each pair of wind speed measurements of successive measurement heights. The wind speed according to this assumption shall be calculated for at least 10 height levels equally distributed between each pair of measurement heights. The summation according to Equation (Q.1) shall be repeated with all height levels covered by the wind veer profile assumption and measurement heights and by assuming a constant wind speed for all heights. The percentage deviation of the resulting rotor equivalent wind speed to the rotor equivalent wind speed using only the measured wind directions, shall be assumed as (percentage) standard uncertainty of the wind speed due to the limited number of wind direction measurement heights.

The estimation of the uncertainty due to the limited number of wind direction measurement heights shall be performed on the basis of the bin averages of the wind direction measurements at the different height levels as function of the wind speed finally applied for the power curve evaluation.

NOTE The 10-min data sets are necessary for the calculation.

E.11.2.4 Category B uncertainties: Method – Wind conditions – Upflow

This uncertainty component covers the uncertainty related to fewer than nine measurement heights for upflow. This uncertainty component shall be applied for sites that do not meet the requirements of Annex B.

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,upflow,i}$.

The default magnitude for this uncertainty component can be found in Table E.5.

Table E.5 – Uncertainty contributions due to lack of upflow knowledge

Number of measurement heights	[% of wind speed]
0 (no upflow measurement)	0,3 to 0,5
1 (at hub height only)	0,15 to 0,25
2 (lower rotor area)	0,08 to 0,12
3	0,03 to 0,07
5	0,015 to 0,025
7	0,005 to 0,015

Please note that this is a very different uncertainty component for upflow than is considered in the classification of the wind speed sensor where also upflow is included. In that case we are looking at the inaccurate measurement of the horizontal wind speed due to the presence of a vertical wind speed component. Here we consider the influence of the upflow on the turbine's performance. Although we define a horizontal wind speed, the turbine's performance still varies when a vertical component is present.

E.11.2.5 Category B uncertainties: Method – Wind conditions – Turbulence intensity

This uncertainty component covers the uncertainty related to not having a measurement for hub height turbulence.

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,ti,i}$.

For turbulence we do not consider other measurement heights as Clause 5 of this standard defined the power curve only for hub height turbulence. This is a required signal. The reason this is still included as an additional uncertainty components is that the measurement configuration with a lower-than-hub height meteorological mast only has a hub height turbulence measured by a remote sensing device. The turbulence as measured by a remote sensing device is significantly different from the turbulence as measured by a sonic or cup anemometer. Hence the additional uncertainty.

The default magnitude for this uncertainty component can be found in Table E.6.

Table E.6 – Uncertainty contributions due to lack of turbulence knowledge

Number of measurement heights	[% of wind speed]
0 (no accurate <i>TI</i> due to RSD)	0,3 % to 0,5 %

E.11.3 Category B uncertainties: Method – Seasonal effects

This uncertainty component covers the uncertainty related to the influence of seasonal effects on the power curve. Note that some seasonal variations contribute in the wind speed

uncertainty as they influence the wind profile characteristics (shear, turbulence, etc.). These variations are treated separately.

Some other contributions, such as blade accretion from bugs and/or dirt on the blades (e.g. during a warm and dry period), increase the blade surface roughness and deteriorate the blade aerodynamic performance. Therefore, for the same kinetic energy in the wind, the turbine production will be lower when blades are dirty. These contributions are combined in the uncertainty component $u_{M,sfx,i}$.

Clearly, these contributions do not influence the wind profile characteristics and therefore, strictly speaking, are effects on the electrical power. However, with the purpose to quantify the contribution to the *AEP* variation, this uncertainty component is more conveniently expressed as uncertainty in the wind speed.

A default magnitude of 0,7 % on the wind speed is suggested, yet the magnitude of this component will vary with the site location and the year period of the performance test and where possible it should be estimated from experience or *AEP* variation data from the specific site.

E.11.4 Category B uncertainties: Method – Turbulence normalisation (or the lack thereof)

This uncertainty component covers the uncertainty related to the turbulence normalisation of the power curve

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,tinorm,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex M and 9.1.6.

The turbulence normalisation given in Annex M is designed to handle effects of the 10 min data averaging on the evaluated power curve. There are further effects of the turbulence intensity on wind turbine power curves, which could, for instance, be due to direct impact of the turbulence intensity on the aerodynamics or due to the 3-dimensional character of turbulence. In the end, the turbulence intensity normalisation is a strongly simplified approach for characterising short term wind speed fluctuations. Thus, there is a remaining uncertainty of the evaluated power curve due to possible turbulence effects, even if the turbulence normalisation procedure is applied. The turbulence normalisation often removes about half of the observed effect of the turbulence intensity on measured wind turbine power curves. Thus, the following steps should be performed in order to calculate the uncertainty of the turbulence normalisation:

- a) The final bin-averaged power curve shall be evaluated on the basis of the turbulence normalised power output and on the basis of the non-turbulence normalised power output.
- b) the deviation of these two power curves shall be assumed to be the maximum uncertainty of the turbulence-normalised power curve per wind speed bin resulting from the turbulence normalisation. The standard uncertainty resulting from the turbulence normalisation per wind speed bin shall be calculated as the deviation of the power curves divided by $\sqrt{3}$. The standard uncertainty shall be combined with the other uncertainties of the power performance measurement for the determination of the total standard uncertainty according to Annex D.

In the absence of turbulence normalisation, the uncertainty due to turbulence effects on the power curve should be calculated as described in Clause M.5.

E.11.5 Category B uncertainties: Method – Cold climate

This uncertainty component covers the uncertainty related to the influence of measurement in cold climate on the classification of the anemometers.

The symbol for this uncertainty component is $u_{M,cc,i}$.

This uncertainty is also discussed in Annex O of this standard.

If an extended temperature range is required, the uncertainty component for the sensor classification shall be based on a class S classification report; this is covered by the uncertainty component $u_{VS,class,i}$.

Although ice detection is recommended, it cannot be avoided that snow and ice will accrete on the mounting structure and thus influence the measured wind speed. This aspect is covered by the uncertainty component as discussed here.

Please note that these considerations already should be considered for 'normal' class B measurements, as class B extends to -10 °C and most snow and ice occurs around 0 °C . If a measurement is exposed to more than a few days of snow and/or ice, this additional uncertainty component shall be applied. Otherwise this components can be set to zero.

The default magnitude of this uncertainty component is 0,5 % to 1 % on wind speed.

E.12 Category B uncertainties: Wind direction

E.12.1 General

There is an influence of the wind direction uncertainty on the power curve through the site calibration as well as a smaller effect. Based on the magnitude of the wind direction uncertainty compared to the site calibration bin size, some data will be incorrectly assigned to a bin. For a bin size of 10° and a wind direction uncertainty of 5° , roughly 39 % of the data in a bin has been wrongly assigned. Although this will tend to average out, it can have an effect for small measurement sectors and large differences between adjacent bins. A similar argument goes for the filtering on the power curve measurement sector, but to a lesser extent.

These uncertainties shall only apply if the wind direction sensor or its mounting is changed for sites on which a site calibration was performed.

This background is the main reason why the standard requires that the wind direction uncertainty is assessed to ensure that it stays below 5° .

The influence from the wind direction on the power curve and *AEP* is not quantifiably established and no sensitivity factors have been developed.

As the wind direction uncertainty shall be reported, Clause E.12 gives the minimum uncertainty components that shall be considered for the wind direction uncertainty. An estimate of the magnitude of these components is not given, but shall be included for a reported power curve.

E.12.2 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic

E.12.2.1 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic – Calibration

This uncertainty component covers the uncertainty related to the calibration of the wind direction sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WV,cal,i}$.

The resolution of the wind direction sensor is also included here and this value divided by $2\sqrt{3}$ shall be taken as a minimum value.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.2.2 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic – North mark

This uncertainty component covers the uncertainty related to the accurate determination of the sensors north mark in relation to the boom on which the sensor is installed.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WV,nm,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.2.3 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic – Boom orientation

This uncertainty component covers the uncertainty related to establishing the direction of the boom with regards to the North reference, i.e. magnetic or true.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WV,bo,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.2.4 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic – Operational effects

This uncertainty component covers the uncertainty related to the influence of the mast on the free stream wind direction at the point of measurement.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WV,oe,i}$.

As the wind will flow around the mast, the wind direction as measured by the sensor may not be the free flow wind direction. This effect is covered under this uncertainty component.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.2.5 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic – Magnetic declination angle

This uncertainty component covers the uncertainty related to the difference between magnetic north and true north.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WV,mda,i}$ (MDA stands for magnetic declination angle).

The correction from magnetic north to true north is also related to an uncertainty.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.2.6 Category B uncertainties: Wind direction – Vane or sonic – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the wind direction sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dWV,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.3 Category B uncertainties: Wind direction – RSD

E.12.3.1 Category B uncertainties: Wind direction – RSD – Verification

This uncertainty component covers the uncertainty related to the verification of the wind direction sensor.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WR,ver,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.3.2 Category B uncertainties: Wind direction – RSD – Monitoring

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the wind direction monitoring by the RSD device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WR,mon,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.3.3 Category B uncertainties: Wind direction – RSD – Flow variation

This uncertainty component covers the uncertainty related to the flow variation in different probe volumes.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WR,fv,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.3.4 Category B uncertainties: Wind direction – RSD – Alignment

This uncertainty component covers the uncertainty related to accuracy of the alignment of the RSD device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WR,align,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.3.5 Category B uncertainties: Wind direction – RSD – Magnetic declination angle

This uncertainty component covers the uncertainty related to the correction from magnetic north to true north.

The symbol for this uncertainty component is $u_{WR,mda,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.12.3.6 Category B uncertainties: Wind direction – RSD – Data acquisition

This uncertainty component covers the uncertainty related to the data acquisition of the signal of the RSD device.

The symbol for this uncertainty component is $u_{dWR,i}$.

No default value is given but this uncertainty component shall be assessed and reported.

E.13 Combining uncertainties

E.13.1 General

In Clause E.13, the equations and further considerations to combine uncertainty components to an aggregate level will be presented and discussed. An example is the calculation of the site calibration uncertainty based on the uncertainty components of the site calibration uncertainty.

E.13.2 Combining Category B uncertainties in electric power ($u_{P,i}$)

The standard uncertainty of the electric power for each bin, $u_{P,i}$, is calculated by combining the standard uncertainties from the power transducer, the current and voltage transformers and the data acquisition system:

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P,CT,i}^2 + u_{P,VT,i}^2 + u_{P,PT,i}^2 + u_{dP,i}^2} \quad (\text{E.32})$$

where

- $u_{P,i}$ is the uncertainty on the power measurement;
- $u_{P,CT,i}$ is the uncertainty related to the current transformers;
- $u_{P,VT,i}$ is the uncertainty related to the voltage transformers;
- $u_{P,PT,i}$ is the uncertainty related to the power transducers;
- $u_{dP,i}$ is the uncertainty related to the data acquisition of the power signal.

Considering the default magnitudes for these uncertainty components as given in Clause E.5 the standard uncertainty from the electric power sensor for each bin is:

$$\begin{aligned} u_{P,i} &= \sqrt{(0,43\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (0,29\% P_i [\text{kW}])^2 + (7,2\text{kW})^2 + (0,1\% \cdot 3\,000\text{kW})^2} \\ &= \sqrt{(0,53\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (7,8\text{kW})^2} \end{aligned} \quad (\text{E.33})$$

E.13.3 Combining uncertainties in the wind speed measurement ($u_{V,i}$)

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed, $u_{V,i}$:

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{VHW,i}^2 + u_{VT,i}^2 + u_{AD,method,i}^2} \quad (\text{E.34})$$

where

- $u_{VHW,i}$ is the uncertainty on the hardware used and is one of $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ or $u_{REWS,i}$;
- $u_{VT,i}$ is the uncertainty related to the flow distortion from the terrain;
- $u_{AD,method,i}$ is the uncertainty related to the air density correction.

E.13.4 Combining uncertainties in the wind speed measurement from cup or sonic ($u_{VS,i}$)

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed measurements from cup or sonic, $u_{VS,i}$:

$$u_{VS,i} = \sqrt{u_{VS,precal,i}^2 + u_{VS,postcal,i}^2 + u_{VS,class,i}^2 + u_{VS,mnt,i}^2 + u_{VS,igt,i}^2 + u_{dVS,i}^2} \quad (\text{E.35})$$

where

$u_{VS,precal,i}$	is the uncertainty related to the calibration of the sensor before the start of the power performance test;
$u_{VS,postcal,i}$	is the uncertainty related to the calibration of the sensor during or after the power performance test;
$u_{VS,class,i}$	is the uncertainty related to the classification of the sensors;
$u_{VS,mnt,i}$	is the uncertainty related to the mounting of the sensors;
$u_{VS,igt,i}$	is the uncertainty related to the flow distortion from lighting finial;
$u_{dVS,i}$	is the uncertainty related to the data acquisition of the wind speed signal.

E.13.5 Combining uncertainties in the wind speed measurement from RSD ($u_{VR,i}$)

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed measurements from an RSD device, $u_{VR,i}$:

$$u_{VR,i} = \sqrt{u_{VR,ver,i}^2 + u_{VR,isc,i}^2 + u_{VR,class,i}^2 + u_{VR,mnt,i}^2 + u_{VR,flow,i}^2 + u_{VR,mon,i}^2} \quad (E.36)$$

where

$u_{VR,ver,i}$	is the uncertainty due to the verification test;
$u_{VR,isc,i}$	is the uncertainty due to the in-situ test;
$u_{VR,class,i}$	is the uncertainty related to the classification of the RSD;
$u_{VR,mnt,i}$	is the uncertainty related to the mounting of the RSD;
$u_{VR,flow,i}$	is the uncertainty related to the flow variation across the measurement volume of the RSD;
$u_{VR,mon,i}$	is the uncertainty related to the monitoring of the RSD.

E.13.6 Combining uncertainties in the wind speed measurement from REWS $u_{REWS,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for a wind speed measurements expressed as a rotor equivalent wind speed, $u_{REWS,i}$:

$$u_{REWS,i} = \sqrt{u_{REWS,shear,i}^2 + u_{REWS,veer,i}^2} \quad (E.37)$$

where

$u_{REWS,i}$	is the uncertainty of the rotor equivalent wind speed (REWS);
$u_{REWS,shear,i}$	is the uncertainty due to the influence on REWS from the shear measurement across the rotor;
$u_{REWS,veer,i}$	is the uncertainty due to the influence on REWS from the veer measurement across the rotor.

The value of $u_{REWS,shear,i}$ is taken from one of the following:

- $u_{veq,i}$ (from E.13.7),
- $u_{veq,final,i}$ (from E.13.8),
- or determined through $u_{fr,RSD,k,i}$ (from E.13.9).

The value of $u_{REWS,veer,i}$ is taken from $u_{veq,i}$ (from E.13.10).

The wind speed uncertainty components that are included in the REWS uncertainty are based on Equation (5) of 9.1.3.2 or Equation (11) of section 9.1.3.4. Equation (6) in 9.1.3.2 (which would also influence Equation (11)) implies that there is an uncertainty component related to establishing the correct measurement height. As this is considered to be insignificant for a meteorological mast measurement and is included in a LIDAR calibration as per Annex L, the only concern is with SODAR measurements especially for higher wind speeds when 'beam

bending' may occur. In case this is experienced during a measurement this shall be included as a further uncertainty component.

E.13.7 Combining uncertainties in the wind speed measurement for REWS for either a meteorological mast significantly above hub height or an RSD with a lower-than-hub-height meteorological mast

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for wind speed measurements from an RSD device.

The rotor equivalent wind speed shall be considered as a single wind speed measurement. The total standard uncertainty of the rotor equivalent wind speed in the wind speed bin i can then be expressed by:

$$u_{v_{eq},i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M u_{v_{eq},k,i} u_{v_{eq},l,i} \rho_{k,l,i} \quad (E.38)$$

where

M is the number of uncertainty components of v_{eq} ;

i is the wind speed bin referring to bin averaging of power curve;

$u_{v_{eq},k,i}$ is the standard uncertainty sub-component k of v_{eq} in wind speed bin i ;

$u_{v_{eq},l,i}$ is the standard uncertainty sub-component l of v_{eq} in wind speed bin i ;

$\rho_{k,l,i}$ is the correlation coefficient between the uncertainty component k height m and n in wind speed bin i .

Please note that the sensitivity factors are expressly not included here as they are included in the equation below.

The uncertainty components of v_{eq} in wind speed bin i shall be calculated from the uncertainty components of the wind speed measurements in single measurement heights by the method of error propagation:

$$u_{v_{eq},k,i}^2 = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L c_{m,i} u_{v_m,k,i} c_{n,i} u_{v_n,k,i} \rho_{m,n,k,i} \quad (E.39)$$

where

L is the number of measurement heights across the rotor;

$u_{v_m,k,i}$ is the standard uncertainty sub-component k of wind speed measurement at height m in wind speed bin i ;

$u_{v_n,k,i}$ is the standard uncertainty sub-component k of wind speed measurement at height n in wind speed bin i ;

$c_{m,i}$ is the sensitivity factor of v_{eq} on wind speed at height m in wind speed bin i ;

$c_{n,i}$ is the sensitivity factor of v_{eq} on wind speed at height n in wind speed bin i ;

$\rho_{m,n,k,i}$ is the correlation coefficient between the uncertainty component k height m and n in wind speed bin i .

The sensitivity factors $c_{m,i}$ and $c_{n,i}$ are gained from the definition of the rotor equivalent wind speed by error propagation as:

$$c_{m,i} = \frac{\partial v_{eq,i}}{\partial v_{m,i}} = \frac{A_m}{A} \left(\frac{v_{m,i}}{v_{eq,i}} \right)^2 \quad (\text{E.40})$$

where

A_m is the rotor segment attributed to wind speed measurement at height m according to Equation (6) in 9.1.3.2;

A is the rotor swept area;

$v_{m,i}$ is the wind speed at height m in wind speed bin i ;

$v_{eq,i}$ is the equivalent wind speed in bin i .

For the application of Equation (E.40), the wind speed measured at the different measurement heights $v_{m,i}$ shall be bin averaged as function of the wind speed finally applied for the power curve evaluation (air density normalised and wind shear corrected wind speed).

Equation (E.39) in combination with Equation (E.40) simplifies if either full correlation or no correlation between the uncertainty components at different measurement heights is assumed. The correlation coefficients suggested in Table E.7 should be applied for the calculation of the uncertainties of v_{eq} . Lower correlation coefficients shall be used only if they are evident.

Table E.7 – Suggested assumptions for correlations of measurement uncertainties between different measurement heights²⁶

Component	Correlation coefficient of uncertainties between different measurement heights	Explanation
Wind shear measurement by cup anemometers		
Wind tunnel calibration	1	Calibration in same wind tunnel is required; high correlation of uncertainties of calibrations of different cup anemometers
Cup anemometer classification	1	Anemometers at different heights measure under very similar climatic conditions
Cup anemometer mounting	1, 0	1, if boom mounted and same boom configuration; 0, if one anemometer top mounted and the other boom mounted
Data acquisition system	0	Different input channels applied
Site effects due to distance between the reference meteorological mast and the test wind turbine	1	As a first approximation, the site effects may be assumed to be identical for the rotor height range.
Uncertainty due to limited number of measurements over rotor height range	1	To a first approximation, this uncertainty is fully correlated between the measurement heights
Wind shear measurement by remote sensing device		
Verification test	1	Normally, very similar conditions of reference sensors at different heights present. Sensitivity of accuracy of remote sensing device on measurement height may be ignored.
Sensitivity analysis / classification	1	Classification performed under very similar conditions at different heights. Dependency of sensitivity of remote sensing device on environmental conditions on measurement height may be ignored.
Uncertainty resulting from control with meteorological mast	1	Same uncertainty assumed for all heights
Uncertainty due to flow variation in different probe volumes at same height	1	Normally, quite similar effect expected at different measurement heights. Sensitivity of error on measurement height may be ignored.
Mounting	1	Similar effect of system mounting in different measurement heights
Site effects due to distance between the measurement and the test wind turbine	1	As a first approximation, the site effects may be assumed to be identical for the rotor height range.
Uncertainty due to limited number of measurements over rotor height range	1	To a first approximation, this uncertainty is fully correlated between the measurement heights

²⁶ An additional uncertainty of the determination of the wind speed results from the air density normalisation. This component is produced after the rotor averaging of wind speeds and must be added for the final evaluation of wind speed uncertainties.

NOTE If one assumes that for all components the correlation coefficient is equal to 1 and all components for each height is the same, this procedure simplifies to the extent that the uncertainty calculation can be done as described in Clause E.6 using $v_{eq,i}$ instead of v_i . For fixed values (such as the calibration), this value can be used for $v_{eq}v_{eq,i}$.

E.13.8 Combining uncertainties in the wind speed measurement for REWS for a hub height meteorological mast + RSD for shear using an absolute wind speed

The uncertainty of the wind speed measurement at hub height by means of a cup or sonic anemometer and the uncertainty of the wind shear measurement by the remote sensing device can be considered as being independent from each other. Error propagation on Equation (11) of 9.1.3.4 leads then to the following equation for the uncertainty of the final rotor equivalent wind speed:

$$u_{v_{eq,final,i}}^2 = f_{r,X,i}^2 u_{v_{h,i}}^2 + v_{h,i}^2 u_{f_{r,X,i}}^2 \quad (E.41)$$

where

- $u_{v_{eq,final,i}}$ is the standard uncertainty of final rotor equivalent wind speed in bin i ;
- $f_{r,X,i}$ is the wind shear correction factor in wind speed bin i ;
- $v_{h,i}$ is the wind speed measured at hub height in bin i by cup or sonic anemometer
- $u_{v_{h,i}}$ is the standard uncertainty of $v_{h,i}$ in wind speed bin i ;
- $u_{f_{r,X,i}}$ is the standard uncertainty of $f_{r,X,i}$ in wind speed bin i .

The uncertainty of the wind shear correction factor is (error propagation on Equation (9) and (10) of 9.1.3.3):

$$u_{f_{r,X,i}}^2 = \frac{1}{v_{h,X,i}^2} u_{v_{eq,X,i}}^2 + \frac{v_{eq,X,i}^2}{4 v_{h,X,i}^4} u_{v_{h,X,i}}^2 - 2 \frac{v_{eq,X,i}}{3 v_{h,X,i}^3} u_{v_{eq,X,i}} u_{v_{h,X,i}} \rho_{u_{v_{eq,X,i}}, u_{v_{h,X,i}}} \quad (E.42)$$

where

- $v_{h,X,i}$ is the wind speed measured by remote sensing device in bin i ;
- $u_{v_{h,X,i}}$ is the standard uncertainty of $v_{h,X,i}$;
- $v_{eq,X,i}$ is the rotor equivalent wind speed as measured with the remote sensing device in bin i ;
- $u_{v_{eq,X,i}}$ is the standard uncertainty of $v_{eq,X,i}$ in bin i ;
- $\rho_{u_{v_{eq,X,i}}, u_{v_{h,X,i}}}$ is the correlation coefficient between uncertainty components $u_{v_{eq,X,i}}$ and $u_{v_{h,X,i}}$ in bin i .

Considering that $v_{eq,X,i}$ and $v_{h,X,i}$ both have the same types of uncertainty sub components as given in Table E.7 and assuming that these sub components are independent from each other, Equation (E.42) is equal to:

$$u_{f_{r,X,i}}^2 = \sum_{k=1}^M \frac{1}{v_{h,X,i}^2} u_{v_{eq,X,k,i}}^2 + \frac{v_{eq,X,i}^2}{4 v_{h,X,i}^4} u_{v_{h,X,k,i}}^2 - 2 \frac{v_{eq,X,i}}{3 v_{h,X,i}^3} u_{v_{eq,X,k,i}} u_{v_{h,X,k,i}} \rho_{u_{v_{eq,X,k,i}}, u_{v_{h,X,k,i}}} \quad (E.43)$$

where

$u_{v_{eq,X},k,i}$ is the standard uncertainty component k of rotor equivalent wind speed as measured with the remote sensing device in bin i , to be analysed according to Equation (E.39);

$u_{v_{h,X},k,i}$ is the standard uncertainty component k of hub height wind speed as measured with the remote sensing device in bin i ;

$\rho_{u_{v_{eq,X}},u_{v_{h,X}},k,i}$ is the correlation coefficient between standard uncertainty components $u_{v_{eq,X},k,i}$ and $u_{v_{h,X},k,i}$ in bin i ;

M is the number of uncertainty components of $v_{eq,X}$ and $v_{h,X}$.

For the application of Equation (E.43), $v_{h,X,i}$ and $v_{eq,X,i}$ are gained from bin averaging the rotor equivalent wind speed and the hub height wind speed measured by the remote sensing device as function of the wind speed finally applied for the power curve evaluation (air density and wind shear normalised wind speed). The correlation coefficients between the standard uncertainty components of the rotor equivalent wind speed and the hub height wind speed measured by the remote sensing device $\rho_{u_{v_{eq,X}},u_{v_{h,X}},k,i}$ shall be estimated from the results of the verification test and sensitivity test/classification of the remote sensing device. In some cases, the assumption of correlation coefficients close to 1 can be justifiable.

Equation (E.43) in combination with Equation (E.41) and Equation (E.39) allows evaluating all standard uncertainty components of the final rotor equivalent wind speed. These sub components shall be implemented in Equations (E.3) and (E.4).

According to Equation (E.41), the total uncertainty of the final rotor equivalent wind speed is larger than the uncertainty of the wind speed measured at hub height by the cup or sonic anemometer (at least as soon as the wind shear correction factor exceeds 1). The uncertainty is increased due to the uncertainty of the wind shear correction factor. According to Equation (E.43), this additional uncertainty vanishes if the uncertainties of the rotor equivalent wind speed and the wind speed measured at hub height by the remote sensing device are fully correlated ($\rho_{u_{v_{eq,X}},u_{v_{h,X}},k,i} = 1$) and if the rotor equivalent wind speed is equal to the wind speed at hub height measured by the remote sensing device.

NOTE Assuming all correlation coefficients are equal to 1 and $u_{v_{eq,X},k,i}$ is equal to $u_{v_{h,X},k,i}$ (see E.13.7) the equation for $u_{f_r,X,i}^2$ simplifies as follows:

$$u_{f_r,X,i} = \left(\frac{v_{h,X,i} - v_{eq,X,i}}{v_{h,X,i}^2} \right) \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^M u_{v_{h,X},k,i}^2} \quad (\text{E.44})$$

where

$v_{h,X,i}$ is the wind speed measured by remote sensing device in bin i ;

$u_{v_{h,X},k,i}$ is the standard uncertainty of component k of either $v_{h,X,i}$ or $v_{eq,X,i}$;

$v_{eq,X,i}$ is the rotor equivalent wind speed as measured with the remote sensing device in bin i .

E.13.9 Combining uncertainties in the wind speed measurement for REWS for a hub height meteorological mast and RSD for shear using a relative wind speed

A sensitivity analysis and verification test of the remote sensing device for wind shear measurements instead of for absolute wind speed measurements may be available. This

means that the accuracy of the remote sensing device in terms of wind shear measurements is verified by the verification test, and that the sensitivity of the wind shear measurement on environmental variables is tested for the classification of the remote sensing device. If such a sensitivity analysis and verification test of the remote sensing device is present, it is useful for the evaluation of uncertainties to introduce a relative wind speed measurement as performed by the remote sensing device:

$$v_{r,RSD,m} = \frac{v_{m,RSD}}{v_{h,RSD}} \quad (\text{E.45})$$

where

$v_{r,RSD,m}$ is the relative wind speed measured by remote sensing device at m -th height relative to hub height wind speed measured by remote sensing device;

$v_{h,RSD}$ is the wind speed measured by remote sensing device at hub height;

$v_{m,RSD}$ is the wind speed measured by remote sensing device at m -th height.

The wind shear correction factor as defined in Equation (9) in 9.1.3.3 can then be rewritten as

$$f_{r,RSD} = \left(\sum_{m=1}^L \frac{A_m}{A} v_{r,RSD,m}^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{E.46})$$

where

A_m is the rotor segment attributed to wind speed measurement at m -th height according to Equation (5) in 9.1.3.2;

A is the rotor swept area;

L is the number of measurement heights in the height area of the rotor.

Equation (E.41) can then be applied for assessing the uncertainty of the final rotor equivalent wind speed with the uncertainty components of the wind shear correction factor in wind speed bin i gained from:

$$u_{f_{r,RSD},k,i}^2 = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L c_{v_{r,RSD},m,i} u_{v_{r,RSD},m,k,i} c_{v_{r,RSD},n,i} u_{v_{r,RSD},n,k,i} \rho_{r,m,n,k,i} \quad (\text{E.47})$$

where

L is the number of measurement heights in the height area of the rotor;

$u_{v_{r,RSD},m,k,i}$ is the standard uncertainty component k of relative wind speed measurement at m -th height in wind speed bin i ;

$u_{v_{r,RSD},n,k,i}$ is the standard uncertainty component k of relative wind speed measurement at n -th height in wind speed bin i ;

$c_{v_{r,RSD},m,i}$ is the sensitivity factor of $f_{r,RSD}$ on relative wind speed at m -th height in wind speed bin i ;

$c_{v_{r,RSD},n,i}$ is the sensitivity factor of $f_{r,RSD}$ on relative wind speed at n -th height in wind speed bin i .

The sensitivity factors $c_{v_{r,RSD},m,i}$ and $c_{v_{r,RSD},n,i}$ are:

$$c_{v_{r,RSD},m,i} = \frac{\partial f_{r,RSD,i}}{\partial v_{r,RSD,m,i}} = \frac{A_m}{A} \left(\frac{v_{r,RSD,m,i}}{f_{r,RSD,i}} \right)^2 \quad (\text{E.48})$$

The same uncertainty components as given in Table E.7 shall be applied, but in terms of the remote sensing device relative wind speed measurements rather than in terms of absolute wind speed measurements. In addition, the same correlation coefficients of uncertainty components between two measurement heights as shown in Table E.7 shall be assumed for the relative wind speed measurements, unless evidence exists that other values are present.

The wind speed measured at hub height by the cup or sonic anemometer v_h , the wind shear correction factor $f_{r,RSD}$ and the relative wind speeds $v_{r,RSD}$ measured by the remote sensing device shall be bin averaged against the final wind speed applied for the power curve evaluation for the application of Equations (E.41), (E.47) and (E.48) (wind shear corrected and air density normalised wind speed).

E.13.10 Combining uncertainties in the wind speed measurement from REWS due to wind veer across the whole rotor $u_{REWS,veer,i}$

The rotor equivalent wind speed (taking consideration wind veer according to Annex Q) is dependent on wind speeds and wind directions across the rotor height range. Often, the uncertainties of wind direction and wind speed measurements can be considered as being independent from each other. Then Equation (E.38) in E.13.7 transforms to:

$$u_{v_{eq},i}^2 = \sum_{k=1}^M u_{v_{eq},k,i}^2 + \sum_{l=1}^N u_{v_{eq},l,i}^2 \quad (\text{E.49})$$

where

- M is the number of uncertainty sub-components of v_{eq} related to wind speed measurements;
- i is the wind speed bin referring to bin averaging of power curve;
- $u_{v_{eq},k,i}$ is the standard uncertainty sub-component k of v_{eq} related to wind speed measurements in wind speed bin i ;
- N is the number of uncertainty sub-components of v_{eq} related to wind direction measurements;
- $u_{v_{eq},l,i}$ is the standard uncertainty sub-component l of v_{eq} related to wind direction measurements in wind speed bin i .

The left term in this equation covers all wind speed measurement uncertainties of the rotor equivalent wind speed and shall be treated according to Clause E.8, while the sensitivity factors given in Equations (E.39) and (E.49) shall be multiplied by the third power of $\cos(\phi_m)$, where m is the wind direction difference to hub height at the m^{th} measurement height. This factor shall also be introduced in Equation (E.46) for the definition of the wind shear correction factor.

The right term in this Equation (E.49) covers all wind direction measurement uncertainties of the rotor equivalent wind speed. As is explained in E.8.1, a difficulty in assessing this uncertainty is related to the fact that the uncertainties of the wind direction measurements at the different height levels are correlated with each other. Similar to Equation (E.39), the sub wind direction uncertainty components of v_{eq} in wind speed bin i shall be calculated from the uncertainty components of the wind direction measurements in single measurement heights by the method of error propagation:

$$u_{v_{eq},l,i}^2 = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L c_{m,i} u_{v_m,l,i} c_{n,i} u_{v_n,l,i} \rho_{m,n,l,i} \quad (E.50)$$

where

- L is the number of measurement heights in the height area of the rotor;
- $u_{v_m,l,i}$ is the standard uncertainty sub-component l of wind direction measurement at m -th height relative to hub height in wind speed bin i ;
- $u_{v_n,l,i}$ is the standard uncertainty sub-component l of wind direction measurement at n -th height relative to hub height in wind speed bin i ;
- $c_{m,i}$ is the sensitivity factor of v_{eq} on wind direction at height m relative to hub height in wind speed bin i ;
- $c_{n,i}$ is the sensitivity factor of v_{eq} on wind direction at height n relative to hub height in wind speed bin i ;
- $\rho_{m,n,l,i}$ is the correlation coefficient between standard uncertainty component l of wind direction measurement at height m and height n relative to hub height in wind speed bin i (wind speed bin referring to the power curve).

The sensitivity factors $c_{m,i}$ and $c_{n,i}$ are gained from the definition of the rotor equivalent wind speed by consideration of wind veer by error propagation as:

$$c_{m,i} = \frac{\partial v_{eq,i}}{\partial v_{m,i}} = -\sin(\varphi_{m,i}) \cos^2(\varphi_{m,i}) \frac{A_m}{A} \frac{v_{m,i}^3}{v_{eq,i}^2} \quad (E.51)$$

where

- A_m is the rotor segment attributed to wind speed measurement at m -th height according to Equation (5) in 9.1.3.2;
- A is the rotor swept area;
- $\varphi_{m,i}$ is the wind direction at m -th height relative to wind direction at hub height in wind speed bin i ;
- $v_{m,i}$ is the wind speed at height m in wind speed bin i ;
- $v_{eq,i}$ is the equivalent wind speed in bin i .

For the application of Equation (E.40), the relative wind directions $\varphi_{m,i}$ and wind speeds $v_{m,i}$ measured at the different measurement heights shall be bin averaged as function of the wind speed finally applied for the power curve evaluation (air density normalised, wind shear and wind veer corrected wind speed).

Equation (E.50) in combination with Equation (E.51) simplifies if full correlation, no correlation or anti-correlation between the uncertainty components at different measurement heights is assumed. The correlation coefficients suggested in Table E.8 shall be applied for the calculation of the uncertainties in terms of wind direction of v_{eq} . Lower correlation coefficients shall be used only if they are evident and relevant data is reported.

Table E.8 – Suggested correlation assumptions for relative wind direction measurement uncertainties at different measurement heights

Component	Correlation coefficient of uncertainties between different measurement heights	Explanation
Relative wind direction measurement by vanes or sonic anemometers		
Wind tunnel calibration of vanes used at height m , n and hub height	0,5	The uncertainty of the calibration of single vanes is basically correlated. But as the wind direction differences relative to hub height at heights m and n include the direction measurement at hub height, a correlation coefficient of 0,5 is suggested.
Influence of met mast on wind direction measurements at heights m , n and hub height	0,5; 1	If the vanes at the two heights m and n are mounted in the same way relative to the same mast structure, the uncertainties are fully correlated across the two heights m and n . However, the uncertainty itself gets 0 if the vane at hub height is also influenced in the same way by the met mast. If the vanes at the two heights m and n are mounted different relative to the mast structure, or if the mast structure differs much at two heights m and n , the uncertainties and these two heights can be considered as being uncorrelated. But as the wind direction difference relative to hub height at the two heights m and n includes the direction measurement at hub height, a correlation coefficient of 0,5 is suggested for this case.
Northing of wind direction measurement at height m , n and hub height	0,5	The uncertainty of the northing of single vanes is basically uncorrelated. But as the wind direction relative to hub height at the two heights m and n includes the direction measurement at hub height, a correlation coefficient of 0,5 is suggested.
Data acquisition system (DAS) used to monitor the vanes at height m , n and hub height	0,5	The uncertainty of the DAS channels of single vanes is often basically uncorrelated. But as the wind direction differences relative to hub height at the two heights m and n include the direction measurement at hub height, a correlation coefficient of 0,5 is suggested.
Relative wind direction measurement by remote sensing device		
Wind tunnel calibration of reference vanes used for verification tests at heights m , n and hub height	0,5; 1	These uncertainties of the reference measurement of the verification tests are basically uncorrelated at two heights m and n . But as the wind direction differences relative to hub height at the two heights m and n include the direction measurement at hub height, a correlation coefficient of 0,5 is suggested. An exception is the case of using the same verification test at two height m and n (e.g. if the mast used for the verification test does not cover the entire range of the rotor). Then the uncertainties are fully correlated across the two heights m and n . However, the uncertainty itself gets 0 if the same verification is also applied for hub height.
Northing of reference vanes used for verification tests at heights m , n and hub height	0,5; 1	
Data acquisition system (DAS) used to monitor reference vanes applied for verification tests at heights m , n and hub height	0,5; 1	
Mean deviation of RSD measurement and reference measurement during verification tests at heights m , n and hub height	0,5; 1	
Statistical uncertainty of verification tests at height m , n and hub height	0,5; 1	
Uncertainty of verification tests at height m , n and hub height due to a possible misalignment of the RSD	1	The uncertainty is fully correlated across the heights m and n . However, the respective uncertainty is zero for all heights m and n as the misalignment error cancels out when evaluating the difference

Component	Correlation coefficient of uncertainties between different measurement heights	Explanation
		of the wind direction at height m and n relative to hub height.
Uncertainty of verification tests at height m , n and hub height caused by the assumption of equal wind conditions across the probe volumes of the RSD.	1	These uncertainties are highly correlated across the heights m and n . However, the respective uncertainties are close to zero as the influence on the wind direction measurement at height m (or n) and hub height cancels out when evaluating the difference of the wind directions.
Uncertainty of verification tests at height m , n and hub height due to a possible separation of the centre of the measurement volume of the RSD and the position of the reference mast	1	
Uncertainty due to sensitivity of RSD measurements and environmental variables.	1	
Possible misalignment of the RSD at the power curve test	1	This uncertainties is fully correlated across the heights m and n . However, the respective uncertainties is zero for all heights m and n as the influence on the wind direction measurement at height m (or n) and hub height cancels out when evaluating the difference of the wind directions.
Assumption of equal wind conditions across the probe volumes of the RSD at heights m , n and hub height	1	This uncertainties is highly correlated across the heights m and n . However, the respective uncertainties are close to zero as the influence on the wind direction measurement at height m (or n) and hub height cancels out when evaluating the difference of the wind directions.
Monitoring wind with a met mas at the power curve test	0,5; 1	If the monitoring met mast covers the two heights m and n with different vanes, the uncertainties of the monitoring are basically uncorrelated at two heights m and n . But as the wind direction differences relative to hub height at the two heights m and n include the direction measurement at hub height, a correlation coefficient of 0,5 is suggested in this case. If the monitoring mast provides only one measurement height that can be used to check the RSD measurement at the heights m and n , the uncertainty is fully correlated across the heights m and n . However, the respective uncertainty is then close to zero for all heights m and n as the uncertainty cancels out when evaluating the difference of the wind direction at height m (or n) and hub height.

E.13.11 Combining uncertainties in the wind speed measurement from flow distortion due to site calibration $u_{VT,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for a site calibration, $u_{VT,i}$:

$$u_{VT,i,j} = \sqrt{u_{VT,precal,i,j}^2 + u_{VT,postcal,i,j}^2 + u_{VT,class,i,j}^2 + u_{VT,mnt,i,j}^2 + u_{VT,igt,i,j}^2 + u_{VT,coc,i,j}^2 + u_{VT,rmv,i,j}^2 + u_{VT,sv,i,j}^2 + u_{dVT,i,j}^2 + s_{VT}^2} \quad (E.52)$$

where

$u_{VT,i,j}$ is the uncertainty from the site calibration;

$u_{VT,precal,i,j}$	is the uncertainty related to the calibration of the anemometers;
$u_{VT,postcal,i,j}$	is the uncertainty related to the post calibration or in-situ calibration of the anemometers;
$u_{VT,class,i,j}$	is the uncertainty related to the classification of the sensors;
$u_{VT,mnt,i,j}$	is the uncertainty related to the mounting of the sensors;
$u_{VT,igt,i,j}$	is the uncertainty due to a possible lightning finial on a top mounted anemometer;
$u_{VT,coC,i,j}$	is the uncertainty related to the change of correction value between bins;
$u_{VT,rmv,i,j}$	is the uncertainty related to the removal of the wind direction sensor between site calibration and power performance test;
$u_{VT,sv,i,j}$	is the uncertainty related to the seasonal variation between site calibration and power performance test;
$u_{dVT,i,j}$	is the uncertainty related to the data acquisition of the wind speed signal;
s_{VT}	is the category A standard uncertainty of the site calibration, see C.6.1.

To obtain the uncertainty in one wind speed bin across all the directional sectors the weighted average shall be used:

$$u_{VT,i} = \frac{\sum_j u_{VT,i,j} N_{i,j}}{\sum_j N_{i,j}} \quad (E.53)$$

where $N_{i,j}$ is number of power curve data sets for wind speed bin i and wind direction bin j .

E.13.12 Combining uncertainties for the temperature measurement $u_{T,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for temperature, $u_{T,i}$:

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T,cal,i}^2 + u_{T,shield,i}^2 + u_{T,mnt,i}^2 + u_{dT,i}^2} \quad (E.54)$$

where

$u_{T,i}$	is the uncertainty of the temperature measurement;
$u_{T,cal,i}$	is the uncertainty related to the calibration of the temperature sensor;
$u_{T,shield,i}$	is the uncertainty related to the shielding of the temperature sensor;
$u_{T,mnt,i}$	is the uncertainty related to the mounting of the temperature sensor;
$u_{dT,i}$	is the uncertainty related to the data acquisition of the temperature signal.

If we make the following assumptions:

- The standard uncertainty of the temperature sensor is 0,5 °C.
- The shielding of the temperature sensor is 2 °C.
- The standard uncertainty due to mounting effects of the temperature sensor is dependent on the vertical distance from the hub height. With the temperature sensor mounted within 10 m of hub height a standard uncertainty of 1/3 °C is assumed.
- Considering a temperature range of 40 °C of the measurement channel and a standard uncertainty of the data acquisition system of 0,1 % of this range.

Then the numerical calculation for the standard uncertainty of the air temperature in each bin is:

$$u_{T,i} = \sqrt{(0,5K)^2 + (2,0K)^2 + (0,3K)^2 + (0,1 \% \cdot 40K)^2} = 2,1K \quad (E.55)$$

E.13.13 Combining uncertainties for the pressure measurement $u_{B,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for pressure, $u_{B,i}$:

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B,cal,i}^2 + u_{B,mnt,i}^2 + u_{dB,i}^2} \quad (E.56)$$

where

- $u_{B,i}$ is the uncertainty of the pressure measurement;
- $u_{B,cal,i}$ is the uncertainty related to the calibration of the pressure sensor;
- $u_{B,mnt,i}$ is the uncertainty related to the mounting of the pressure sensor;
- $u_{dB,i}$ is the uncertainty related to the data acquisition of the pressure signal.

If we make the following assumptions:

- The pressure sensor to have a standard uncertainty of 3,0 hPa. It is assumed that the pressure is corrected to the hub height according to ISO 2533 (which, for a standard atmosphere and a height difference of 98 m between the sensor and the hub, is 11,7 hPa). The standard uncertainty due to deployment is estimated to be 10 % of the correction, which is 1,17 hPa.
- Considering a pressure range of 100 hPa of the measurement channel and a standard uncertainty of the data acquisition system of 0,1 % of this range.

Then the numerical calculation for the standard uncertainty of the air pressure is:

$$u_{B,i} = \sqrt{(3,0hPa)^2 + (1,17hPa)^2 + (0,1 \% \cdot 100hPa)^2} = 3,2 hPa \quad (E.57)$$

E.13.14 Combining uncertainties for the humidity measurement $u_{RH,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for humidity, $u_{RH,i}$:

$$u_{RH,i} = \sqrt{u_{RH,cal,i}^2 + u_{RH,mnt,i}^2 + u_{dRH,i}^2} \quad (E.58)$$

where

- $u_{RH,i}$ is the uncertainty of the relative humidity measurement;
- $u_{RH,cal,i}$ is the uncertainty related to the calibration of the relative humidity sensor;
- $u_{RH,mnt,i}$ is the uncertainty related to the mounting of the relative humidity sensor;
- $u_{dRH,i}$ is the uncertainty related to the data acquisition of the relative humidity signal.

If we make the following assumptions:

- The relative humidity sensor to have a standard uncertainty of 1 %;
- The mounting of the sensor to be 0,1 %;
- Considering a pressure range of 100 % of the measurement channel and a standard uncertainty of the data acquisition system of 0,1 % of this range.

Then the numerical calculation for the standard uncertainty of the relative humidity is:

$$u_{RH,i} = \sqrt{(1,0\%)^2 + (0,1\%)^2 + (0,1\% \cdot 100\%)^2} = 1,0\% \quad (E.59)$$

E.13.15 Combining uncertainties for the method related components $u_{M,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for related to the methodology, $u_{M,i}$:

$$u_{M,i} = \sqrt{u_{M, \text{shear},i}^2 + u_{M, \text{veer},i}^2 + u_{M, \text{upflow},i}^2 + u_{M, \text{ti},i}^2 + u_{M, \text{sfx},i}^2 + u_{M, \text{tinorm},i}^2 + u_{M, \text{cc},i}^2} \quad (E.60)$$

where

- $u_{M,i}$ is the uncertainty related to the applied methodology;
- $u_{M, \text{shear},i}$ is the uncertainty related to missing information regarding shear across the whole rotor;
- $u_{M, \text{veer},i}$ is the uncertainty related to missing information regarding wind veer across the whole rotor;
- $u_{M, \text{upflow},i}$ is the uncertainty related to missing information regarding upflow across the whole rotor;
- $u_{M, \text{ti},i}$ is the uncertainty related to missing information regarding turbulence when no hub-height meteorological mast wind speed signal is available;
- $u_{M, \text{sfx},i}$ is the uncertainty related to the unquantifiable seasonal effects on the turbine;
- $u_{M, \text{tinorm},i}$ is the uncertainty related to turbulence normalisation;
- $u_{M, \text{cc},i}$ is the uncertainty related to the measurement in a cold climate.

E.13.16 Combining uncertainties for the wind direction measurement with wind vane or sonic anemometer $u_{WV,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for the wind direction measurement with wind vane or sonic anemometer, $u_{WV,i}$:

$$u_{WV,i} = \sqrt{u_{WV, \text{cal},i}^2 + u_{WV, \text{nm},i}^2 + u_{WV, \text{bo},i}^2 + u_{WV, \text{oe},i}^2 + u_{WV, \text{mda},i}^2 + u_{dWV,i}^2} \quad (E.61)$$

where

- $u_{WV,i}$ is the uncertainty related to the wind direction measured with a mast mounted wind direction sensor (wind vane or sonic anemometer);
- $u_{WV, \text{cal},i}$ is the uncertainty related to the calibration of the wind direction sensor;
- $u_{WV, \text{nm},i}$ is the uncertainty related to north marking of the wind direction sensor;
- $u_{WV, \text{bo},i}$ is the uncertainty related to the boom orientation on which the wind direction sensor is mounted;
- $u_{WV, \text{oe},i}$ is the uncertainty related to the influence of the meteorological mast on the wind direction measurement;
- $u_{WV, \text{mda},i}$ is the uncertainty related to the magnetic declination angle;
- $u_{dWV,i}$ is the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the wind direction sensor.

E.13.17 Combining uncertainties for the wind direction measurement with RSD $u_{WR,i}$

The following uncertainty components are combined to calculate the category B uncertainty for the wind direction measurement with RSD, $u_{WR,i}$:

$$u_{WR,i} = \sqrt{u_{WR, \text{ver},i}^2 + u_{WR, \text{class},i}^2 + u_{WR, \text{mon},i}^2 + u_{WR, \text{fv},i}^2 + u_{WR, \text{align},i}^2 + u_{WR, \text{mda},i}^2 + u_{dWR,i}^2} \quad (E.62)$$

where

- $u_{WR,i}$ is the uncertainty related to the wind direction measured with an RSD;
- $u_{WR,ver,i}$ is the uncertainty related to the verification test of the RSD;
- $u_{WR,class,i}$ is the uncertainty related to the classification of the RSD;
- $u_{WR,mon,i}$ is the uncertainty related to the monitoring of the RSD;
- $u_{WR,fv,i}$ is the uncertainty related to the variation in wind flow across to measured volume;
- $u_{WR,align,i}$ is the uncertainty related to the alignment of the RSD;
- $u_{WR,mda,i}$ is the uncertainty related to the magnetic declination angle;
- $u_{dWR,i}$ is the uncertainty related to the data acquisition of the signal from the wind direction sensor.

E.13.18 Combined category B uncertainties

The category B uncertainties in each bin are combined as:

$$u_i = \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{v,i}^2 u_{v,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2} \quad (E.63)$$

E.13.19 Combined standard uncertainty – Power curve

The combined standard uncertainties of each bin of the power curve are found by combining the category A uncertainty with all the category B uncertainties.

$$u_{c,i} = \sqrt{S_i^2 + u_i^2} = \sqrt{S_i^2 + u_{P,i}^2 + c_{v,i}^2 u_{v,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2} \quad (E.64)$$

E.13.20 Combined standard uncertainty – Energy production

The combined standard uncertainty of AEP is found by combining individually the category A and B uncertainties bin-wise. This may be accomplished according to the full formulation of Equation (E.4) and shown in Equation (E.65) or the simplified and conservative formulation of Equation (E.5), shown in Equation (E.66):

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B} (\sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i})^2} \quad (E.65)$$

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2} \quad (E.66)$$

where

f_i is the relative occurrence of wind speed between V_{i-1} and V_i ; $F(V_i) - F(V_{i-1})$ within bin i .

E.14 Relevance of uncertainty components under specified conditions

As per the Guide to expression of uncertainty in measurement, in some cases an uncertainty component may be evaluated and found to be insignificant and therefore not be included in the evaluation of the uncertainty of the measurement result.

In this standard, various uncertainty components only should be assigned a zero value in specific cases or when a specific set of conditions have been met. An example is the uncertainty of $u_{VT,coc,i,j}$ which relates to the uncertainty applied in a site calibration when wind direction bins with a change in correction factor larger than 2 % compared to the neighbouring

bin are not eliminated from the data set (see C.7.3 d). Only when the decision is made not to remove such bins does $u_{VT,coc,i,j}$ get a value, otherwise it has value zero.

It is up to the user of this standard to determine in which cases an uncertainty component can be deemed irrelevant and hence set to zero. This should be documented (including the justification) to ensure reproducibility of the uncertainty calculation.

E.15 Reference tables

Table E.9 – Uncertainties from air density normalisation

Bin No. <i>i</i>	Air density normalized wind speed V_{ni} m/s	Wind speed before normalization (un- normalized) V_{uni} m/s	Difference of normalised and un-normalized wind speed $V_{ni} - V_{uni}$ m/s	Uncertainty due to air density normalization $u_{PI,i}$ m/s
4	2,03	2,025	0,008	0,004
5	2,51	2,501	0,013	0,007
6	3,03	3,015	0,014	0,007
7	3,52	3,501	0,016	0,008
8	4,02	4,000	0,022	0,011
9	4,53	4,503	0,028	0,014
10	5,00	4,976	0,029	0,014
11	5,55	5,523	0,031	0,016
12	6,03	5,991	0,035	0,017
13	6,56	6,503	0,055	0,028
14	7,01	6,970	0,041	0,021
15	7,55	7,485	0,061	0,031
16	8,04	7,979	0,065	0,032
17	8,57	8,503	0,064	0,032
18	9,08	8,999	0,080	0,040
19	9,58	9,494	0,090	0,045
20	10,10	10,007	0,091	0,045
21	10,61	10,501	0,113	0,056
22	11,10	10,982	0,122	0,061
23	11,60	11,475	0,121	0,060
24	12,11	11,986	0,125	0,062
25	12,64	12,504	0,139	0,070
26	13,17	13,034	0,134	0,067
27	13,59	13,467	0,123	0,061
28	14,18	14,020	0,157	0,079
29	14,62	14,479	0,140	0,070
30	15,07	14,916	0,149	0,075
31	15,76	15,611	0,151	0,075
32	16,09	15,941	0,147	0,073
33	16,83	16,680	0,150	0,075
34	17,03	16,926	0,100	0,050
35	17,81	17,586	0,226	0,113

Bin No. i	Air density normalized wind speed $V_{n\ i}$ m/s	Wind speed before normalization (un- normalized) $V_{un\ i}$ m/s	Difference of normalised and un-normalized wind speed $V_{ni} - V_{un\ i}$ m/s	Uncertainty due to air density normalization $u_{P\ I, i}$ m/s
36	18,19	18,052	0,135	0,068
37	18,5	0,152 2	0,135	0,068
38	19	0,152 1	0,135	0,068
39	19,5	0,153 9	0,135	0,068
40	20	0,154 1	0,135	0,068
41	20,5	0,150 5	0,135	0,068
42	21	0,151 2	0,135	0,068
43	21,5	0,154 8	0,135	0,068
44	22	0,153	0,135	0,068
45	22,5	0,153 3	0,135	0,068
46	23	0,155 7	0,135	0,068
47	23,5	0,156 7	0,135	0,068

Table E.10 – Sensitivity factors

Bin No. <i>i</i>	Power curve (database B)		Sensitivity factors		
	Wind speed V_i m/s	Electric power P_i kW	Wind speed $c_{V,i}$ kW/m/s	Air temperature $c_{T,i}$ kW/K	Air pressure $c_{B,i}$ kW/hPa
4	2,13	–3,64	1,712	0,013	0,004
5	2,49	–3,65	0,014	0,013	0,004
6	2,99	–3,78	0,269	0,013	0,004
7	3,51	–2,19	3,062	0,008	0,002
8	3,99	–0,43	3,645	0,001	0,000
9	4,50	6,04	12,825	0,021	0,006
10	4,98	27,70	44,664	0,096	0,027
11	5,52	67,39	74,049	0,234	0,067
12	5,98	111,30	94,430	0,386	0,110
13	6,51	160,95	95,019	0,558	0,159
14	7,01	209,42	95,472	0,727	0,207
15	7,50	261,96	107,566	0,909	0,259
16	8,00	327,63	131,992	1,137	0,323
17	8,50	395,23	136,290	1,372	0,390
18	8,99	462,01	134,677	1,603	0,456
19	9,49	556,06	187,824	1,930	0,549
20	10,00	629,80	145,079	2,186	0,622
21	10,47	703,06	155,957	2,440	0,694
22	11,00	786,55	157,358	2,729	0,776
23	11,50	836,48	100,000	2,903	0,826
24	11,99	893,52	116,327	3,101	0,882
25	12,49	928,61	70,200	3,223	0,917
26	13,03	956,44	51,481	3,319	0,944
27	13,50	971,30	31,702	3,371	0,959
28	14,00	980,92	19,200	3,404	0,968
29	14,48	988,17	15,208	3,429	0,976
30	15,00	993,46	10,192	3,448	0,981
31	15,49	993,71	0,408	3,449	0,981
32	15,99	995,70	4,000	3,455	0,983
33	16,54	996,22	0,909	3,457	0,983
34	17,02	996,42	0,417	3,458	0,984
35	17,48	996,48	0,217	3,458	0,984
36	17,95	996,50	0,000	3,458	0,984
37	18,49	995,71	0,556	3,457	0,983
38	18,97	996,6	0,833	3,459	0,984
39	19,42	996,1	1,111	3,457	0,983
40	19,96	994,1	3,704	3,450	0,981
41	20,51	987,4	12,182	3,427	0,975
42	20,88	996,9	25,676	3,460	0,984

Table E.11 – Category B uncertainties

Bin No.	Electric power	Wind speed	Wind speed	Air temperature	Air temperature	Air pressure	Air pressure
i	$u_{P,i}$ kW	$u_{V,i}$ m/s	$c_{V,i} \cdot u_{V,i}$ kW	$u_{T,i}$ K	$c_{T,i} \cdot u_{T,i}$ kW	$u_{B,i}$ hPa	$c_{B,i} \cdot u_{B,i}$ kW
4	6,29	0,19	0,33	2,09	0,03	3,18	0,01
5	6,29	0,19	0,00	2,09	0,03	3,18	0,01
6	6,29	0,19	0,05	2,09	0,03	3,18	0,01
7	6,29	0,19	0,60	2,09	0,02	3,18	0,01
8	6,29	0,20	0,71	2,09	0,00	3,18	0,00
9	6,29	0,20	2,53	2,09	0,04	3,18	0,02
10	6,29	0,20	8,85	2,09	0,20	3,18	0,09
11	6,30	0,20	14,82	2,09	0,49	3,18	0,21
12	6,32	0,20	19,04	2,09	0,81	3,18	0,35
13	6,35	0,20	19,34	2,09	1,17	3,18	0,51
14	6,39	0,21	19,58	2,09	1,52	3,18	0,66
15	6,44	0,21	22,28	2,09	1,90	3,18	0,82
16	6,52	0,21	27,66	2,09	2,37	3,18	1,03
17	6,62	0,21	28,87	2,09	2,86	3,18	1,24
18	6,74	0,21	28,86	2,09	3,35	3,18	1,45
19	6,93	0,22	40,71	2,09	4,03	3,18	1,75
20	7,09	0,22	31,82	2,09	4,57	3,18	1,98
21	7,28	0,22	34,61	2,09	5,10	3,18	2,21
22	7,51	0,22	35,38	2,09	5,70	3,18	2,47
23	7,65	0,23	22,77	2,09	6,06	3,18	2,63
24	7,82	0,23	26,81	2,09	6,48	3,18	2,81
25	7,93	0,23	16,41	2,09	6,73	3,18	2,92
26	8,02	0,24	12,20	2,09	6,93	3,18	3,00
27	8,07	0,24	7,61	2,09	7,04	3,18	3,05
28	8,10	0,24	4,67	2,09	7,11	3,18	3,08
29	8,13	0,25	3,75	2,09	7,16	3,18	3,10
30	8,14	0,25	2,55	2,09	7,20	3,18	3,12
31	8,14	0,25	0,10	2,09	7,20	3,18	3,12
32	8,15	0,26	1,03	2,09	7,22	3,18	3,13
33	8,15	0,26	0,24	2,09	7,22	3,18	3,13
34	8,15	0,26	0,11	2,09	7,22	3,18	3,13
35	8,15	0,27	0,06	2,09	7,22	3,18	3,13
36	8,15	0,27	0,00	2,09	7,22	3,18	3,13
37	8,15	0,28	0,15	2,09	7,22	3,18	3,13
38	8,15	0,28	0,23	2,09	7,22	3,18	3,13
39	8,15	0,28	0,32	2,09	7,22	3,18	3,13
40	8,15	0,29	1,07	2,09	7,21	3,18	3,12
41	8,12	0,29	3,54	2,09	7,16	3,18	3,10
42	8,15	0,29	7,54	2,09	7,23	3,18	3,13

Annex F (normative)

Wind tunnel calibration procedure for anemometers

F.1 General requirements

The general requirements for the calibration of anemometers are summarized as follows:

- a) the calibration of the anemometer shall be carried out in a wind tunnel that is suitable for the calibration of anemometers;
- b) the calibration facility shall be recognised by IECRE or accredited in accordance with ISO/IEC 17025, being the main standard for testing and calibration laboratories;
- c) all transducers and measuring equipment relevant for the calibration of anemometers shall have traceable calibrations according to ISO/IEC 17025. Calibration certificates and reports shall contain all relevant traceability information;
- d) the reference wind speed shall be measured with a pitot-static tube that shall be of NPL type with ellipsoidal head according to ISO 3966. The pitot-static tube shall be calibrated for appropriate wind speed ranges, and be documented. The reference wind speed may alternatively be measured by LDA (Laser Doppler Anemometry) with well documented uncertainties;
- e) consistency of the experimental set-up shall be verified by at least daily comparative calibrations of the facility's "quality control anemometer";
- f) flow quality shall be verified as required in Clause F.2;
- g) the repeatability of the calibration shall be verified as required in Clause F.2;
- h) anemometer calibration shall be supported by a thorough assessment of calibration uncertainty, carried out in accordance with ISO Guide 98-3:2008.

F.2 Requirements to the wind tunnel

The presence of the anemometer shall not substantially affect the flow field in the wind tunnel. During measurements the anemometer will to some extent be influenced by wind tunnel blockage and boundary effects. The blockage area ratio (*BR*) – defined as the ratio of the anemometer projected area, perpendicular to flow direction, (including its mounting system and projected area of a spinning rotor) to the total test section area – shall not exceed 0,05. Blockage effects shall always be accounted for according to F.4.3.

It is recommended that the wind tunnel test section has a height of at least 1,0 m and a width of at least 1,0 m.

The flow in the cross sectional area, where the anemometer will be located, shall be uniform. Flow uniformity should be measured using velocity sensing devices, i.e. pitot tubes, hot wires or Laser Doppler Velocimetry to measure flow profiles in longitudinal, transversal and vertical direction. Over the calibration wind speed range, the maximum difference in the mean velocity between any two points inside the measurement volume shall be less than 0,2 %. The mean value shall be calculated during at least five minutes and the measurement volume shall cover the active volume of the anemometer with 50 % margin in all directions as per Figure F.1. Uniformity shall be tested over a period of at least 5 minutes for wind speeds at approximately 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s and 16 m/s each.

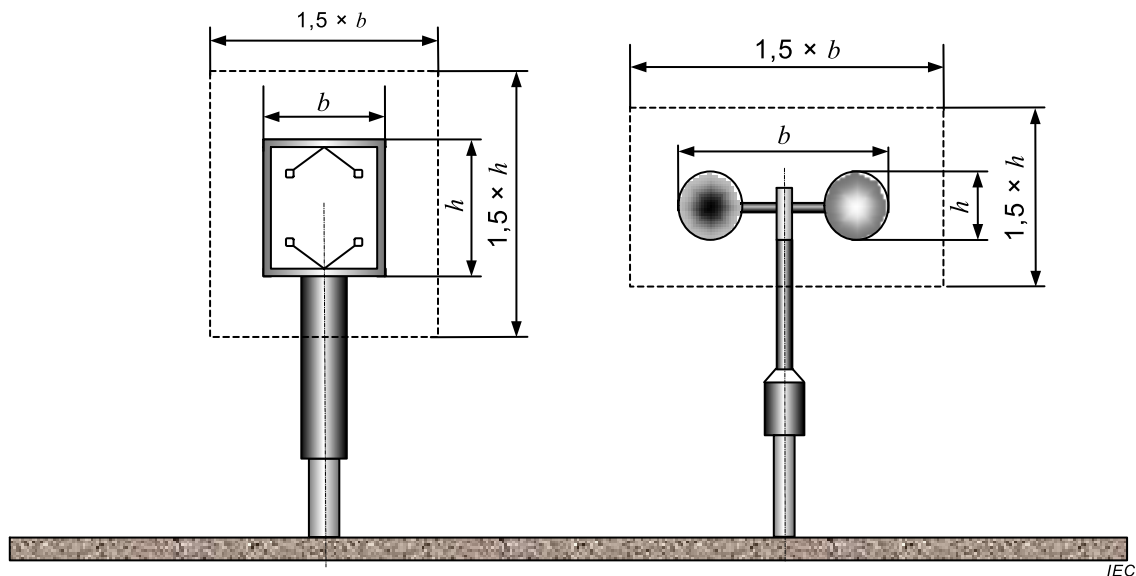


**Figure F.1 – Definition of volume for flow uniformity test –
The volume will also extend $1,5 \times b$ in depth (along the flow)**

The stability of the flow shall be measured in the middle of the volume of which uniformity was verified. The flow can be considered stable if 10 consecutive 30 s means are within 0,5 % of their average value.

Cup anemometers are very sensitive to horizontal wind gradients. Different horizontal wind gradients can be seen depending on pollution of nets and smoothing devices. Therefore, it is useful to check the horizontal wind gradient by using two identical pitot tubes. They shall be placed at the exact position where the anemometer will be placed with their heads spanning approximately the area covered by the cup anemometers rotating cups. A set of measurements shall be made and the linear regression between the dynamic pressures measured by the two pitot tubes shall be calculated. The difference in wind speed shall be less than 0,2 % over a period of at least 5 minutes. The influence due to the presence of the anemometer type to be calibrated (including mounting tube) on the flow speed measured by the pitot tube shall be verified to be less than $\pm 0,2 \%$.

The axial turbulence intensity in wind speed at the anemometer's position shall be below 2 %. The turbulence intensity shall include longitudinal wind speed fluctuations with frequencies of up to 10 Hz. The data for turbulence measurements shall be acquired for a duration of 60 s per wind speed at a sampling rate of at least 20 Hz. Turbulence assessment shall be performed for at least the flow speeds 7 m/s, 10 m/s and 13 m/s with a device that is suitable to measure wind speed fluctuations with a cut-off frequency of at least 20 Hz. Deviations from the above requirements shall be assessed through suitable tests and be considered in the uncertainty evaluation.

The wind tunnel calibration factor, which gives the relation between the conditions at the reference measurement position and those at the anemometer position, shall be appraised using pitot tubes for a speed range of 4 m/s to 16 m/s.

The calibration setup shall undergo a detailed examination of the repeatability of anemometer calibrations. The calibration facility shall designate reference anemometers of representative size for use in these tests. The standard deviation and maximum deviation of the quality control anemometer output in the calibration speed range should be less than 0,2 % and 0,6 %, respectively, of the mean value.

The facility shall prove, through proficiency testing, that its results are comparable with other anemometer calibration facilities, according to ISO 17043.

F.3 Instrumentation and calibration set-up requirements

Dedicated external signal conditioning equipment such as frequency to voltage converters, etc. shall be calibrated in isolation from the anemometer, so allowing the anemometer's calibration to be derived and reported in isolation from the signal conditioning equipment.

The resolution of the data acquisition system shall be at least 0,02 m/s. Care shall also be exercised in the case of an analogue voltage instrument, to ensure that the signal is adequately buffered to prevent its attenuation by low impedance logging equipment.

Mounting arrangements can have dramatic effects on instrument performance, particularly if the ratio of tube diameter to rotor diameter is high. Therefore, during calibration, the anemometer shall be mounted on top of a tube in order to minimize flow distortion and only one anemometer may be calibrated at a time. This tube shall be of the same diameter as the one on which the anemometer will be mounted in service in the free atmosphere. It is recommended that the vertical distance between the anemometer rotor relative to the upper and lower boundaries of the wind tunnel test section should not be less than 0,5 m. In case of a directional sensitive anemometer with respect to horizontal flow, a reference orientation has to be defined and documented and referred to during calibration. The anemometer shall be positioned at the test section perpendicular to the flow field of the wind tunnel as accurate as possible. The maximum deviation of the anemometer mounting tube is 0,2°. An example of a typical cup anemometer tilt response is shown in Figure J.1.

It is important to ensure that the anemometer is not influenced by the presence of any reference wind speed measurement equipment. Conversely, the presence of the anemometer shall not affect the flow in the region of the reference instrument. If flow distortion effects are encountered, then the pitot tube shall be repositioned. This effect can be assessed by removing and then reinstating the anemometer and afterwards the reference instrument, and ascertaining whether the output of the remaining instrument changes.

The pitot static tubes shall be positioned in the test section aligned with the mean flow direction. The maximum misalignment allowed is 0,5°.27

During calibration, the anemometer output signal shall be examined to ensure that it is not subject to interference or noise.

F.4 Calibration procedure

F.4.1 General procedure cup and sonic anemometers

The anemometer shall run in for minimum 5 min at about 10 m/s before the calibration procedure begins. Calibration shall be performed under both rising and falling wind speed in the range of 4 m/s to 16 m/s at a calibration interval of 1 m/s or less²⁸. If heating is switched on during calibrations, it shall be noted in the calibration certificate.

The sampling frequency shall be at least 1 Hz and the sampling interval at least 30 s. This sampling interval can be increased when low resolution anemometers are calibrated. It is important to ensure that anemometer and reference wind speed readings span the same period of time. Before collecting data at each wind speed, adequate time shall be allowed for stable flow conditions to become established, see Clause F.2. This may take 1 min, but will vary from facility to facility.

²⁷ Misalignment of pitot static tubes may lead to a bias in differential pressure measurement! An alignment to within 0,5° of the mean flow direction assures a bias in differential pressure reading of less than 0,1 % for the NPL type Pitot tube (see ISO 3966:2008, Figure A.5).

²⁸ 1 m/s intervals can also be realized with the allowance for 2 m/s jumps, for example 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 15 m/s, 13 m/s, 11 m/s, 9 m/s, 7 m/s, 5 m/s.

F.4.2 Procedure for the calibration of sonic anemometers

Sonic anemometers are designed to measure 2D or 3D wind components. For the purpose of power performance measurements sonic anemometers shall be set up for measurement of horizontal wind speed preferably internally or by post processing.

During calibration the complete sonic anemometer shall be placed in the wind tunnel test section. The active part of the sonic anemometer shall be located within the test section volume. The yaw alignment shall be set at the reference calibration yaw direction, see Clause F.3. It is often advantageous to set a yaw alignment that imposes the least flow disturbance from the supports of the acoustic transceivers.

The setup parameters of the sonic during its calibration shall be documented in the calibration certificate or alternatively in an annex of the calibration certificate. The calibration holds only for identical settings of the sensor and identical signal output format.

For this test, the sonic anemometer shall be calibrated at variable wind speeds according to F.4.1. Calibrations of additional yaw position (i.e. yaw angle for max. flow disturbance from the supports) may be performed if desired. Calibrations of additional yaw positions should be performed at 10 m/s as a quality control of compliance with classification results.

Status signal of the sonic anemometer (if available) shall be monitored during the calibrations. The status signal shall be used to exclude erroneous data.

F.4.3 Determination of the wind speed at the anemometer position

Air density ρ shall be calculated on the basis of the mean wind tunnel air temperature T , relative humidity ϕ and barometric pressure B , using Equation (F.1) (standard uncertainty less than 10^{-3} kg/m³):

$$\rho = \frac{1}{T} \left(\frac{B}{R_0} - \phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (\text{F.1})$$

where

B is the barometric pressure [Pa];

T is the absolute temperature [K];

ϕ is the relative humidity (range 0 to 1);

R_0 is the gas constant of dry air [287,05 J/kgK];

R_w is the gas constant of water vapour [461,5 J/kgK];

P_w is the vapour pressure [Pa].

Vapour pressure P_w depends on mean air temperature.

$$P_w = 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T) \quad (\text{F.2})$$

The mean flow speed at anemometer position is calculated from mean differential pressure

Δp_{ref} at reference position using the equation:

$$\bar{v} = f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots) a k_c \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\text{ref},i}}{\rho}} \quad (\text{F.3})$$

where

α	is the pitot static tube head coefficient;
k_c	is the wind tunnel calibration factor, which gives the relation between the conditions at the reference measurement position and those at the anemometer position;
$f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$	is a correction function due to interference between the anemometer including its mounting tube and the wind tunnel flow;
k_b	is the interference correction factor due to blockage;
k_i	is the correction factor due to interference between the anemometer (including mounting tube) and test section enclosure, also including flow effects due to mounting tubes extending through the enclosure;
k_p	is the correction factor due to interference caused by the anemometer (including mounting tube) on the velocity measured by the pitot tube;
$\bar{v}$	is the average wind speed at the anemometer position;
$\bar{v}_p$	is the average wind speed at the reference position;
n	is the number of samples within the sampling interval.

The correction function $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ should be equal to one for a test section without an anemometer and its supporting tube. The influence of the correction function on the calibration results shall be assessed and included in the calibration facility setup report and uncertainty calculation.

F.5 Data analysis

A linear regression analysis shall be carried out on the calibration data for the estimation of the following regression parameters: Offset, slope, regression coefficient, standard uncertainty. The wind speed values shall be regressed upon the anemometer outputs.

If the correlation coefficient, r , for the data is less than 0,999 95 then it shall be checked if it is caused by anemometer non-linearity or due to other reasons. In case of anemometer non-linearity, it shall be documented in the certificate.

F.6 Uncertainty analysis

It is important to identify the uncertainty of the horizontal wind speed incident upon the anemometer. It is required that an uncertainty analysis is carried out in accordance with the ISO/IEC Guide 98:2008 comprising both category A and category B uncertainty. The magnitude of the net uncertainty shall be assessed statistically and shall take account of:

- flow speed measurement uncertainty (pitot tubes, transducers, air density evaluation, etc.);
- wind tunnel calibration factor;
- wind tunnel correction factors through the correction function $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ defined in Equation (F.3);
- the influence of wind tunnel cross section size shall be assessed as part of the uncertainty analysis;
- measurement of anemometer output;
- the influence of non-vertical anemometer alignment shall be considered for each anemometer type in the uncertainty assessment;

- g) statistical uncertainty due to short term scatter of the anemometer output (variation of the indicated anemometer signal, i.e. fluctuation of the angular rotor velocity, bias from signal generation, sampling bias, over the averaging time);
- h) uncertainty due to the difference between the result of the wind tunnel performing the calibration and the average result of other wind tunnels as determined through proficiency testing to the extent not covered by other uncertainty components;
- i) uncertainty due to linearization of calibration expression.

F.7 Reporting format

The relevant documentation shall provide information on the procedure followed and the facility used for calibrating the anemometers (report on the calibration facility setup) and on the individual anemometer calibration. The calibration facility setup report shall contain the following information as a minimum:

- a) description of the wind tunnel (including test section, settling chamber, flow straighteners, fan arrangement);
- b) sketch of the wind tunnel showing the positions of anemometer and pitot tube(s) in the test section;
- c) flow quality measurements;
- d) blockage effect assessment;
- e) influence of mounting height of the anemometer;
- f) influence of bottom plate;
- g) influence of mounting position into reference measurement;
- h) influence of the correction function;
- i) turbulence measurements;
- j) instrumentation certificates;
- k) measurement procedure;
- l) data evaluation procedure;
- m) repeatability documentation of the anemometer calibration;
- n) uncertainty analysis;
- o) deviations from these requirements.

The calibration report of an anemometer shall as a minimum contain the following information:

- 1) make, type and serial number of the tested anemometer and cup serial number if transported separately;
- 2) specification of yaw orientation during calibration (yaw sensitive devices);
- 3) tube diameter of the mounting system;
- 4) make, type and serial number of external converters;
- 5) name and address of the customer;
- 6) signatures from the persons who carried out the calibration, checked the results and approved their issue;
- 7) name of the wind tunnel;
- 8) environmental conditions during calibration (air temperature, air pressure and humidity);
- 9) regression parameters (offset, slope, regression coefficient);
- 10) uncertainty due to linearization (scatter of residuals);
- 11) uncertainty due to the correction function $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$;

- 12) tabular and graphical presentation (deviations from linear regression line amplified) of all calibration points and regression results;
- 13) uncertainty associated to each measuring point;
- 14) reference to the corresponding calibration facility set up report;
- 15) date of the calibration;
- 16) photo showing the anemometer and the mounting in the wind tunnel.

F.8 Example uncertainty calculation

As it is practically impossible to measure the flow velocity at the place of the anemometer and as the sensor in the wind tunnel experiences a significantly smaller flow field as in the free atmosphere, corrections are necessary. The optimization of the wind tunnel in terms of the corrections as well as the determination of the correction factor is crucial for the calculation of the measurement uncertainty.

Ideally, the uncertainty calculation should be applied independently to each wind speed calibration condition used in a calibration test. For this example, take a notional calibration point of 10 m/s using a wind tunnel rated at 25 m/s.

Table F.1 deals with each uncertainty source; first with those of category B.

To avoid repetition, a detailed assessment of barometric pressure measurement has been left out, as it can be dealt with in the same way as temperature measurement.

Table F.1 – Example of evaluation of anemometer calibration uncertainty

Error source u_i	Discussion	Value u_i	Sensitivity value c_i	$u_i c_i$ m/s
u_f , wind tunnel correction factor, f	An uncertainty on the correction factor $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ based on investigation of calibration influence factors.			
u_i , wind tunnel calibration factor, k_c	Wind tunnel calibration can be carried out by using two pitot tubes, one at the permanent reference position and one at the location to be occupied by the test anemometer. By swapping the two pitot systems, all category B errors can be eliminated, and standard regression analysis can be applied to yield a correction factor (the intercept being forced through the origin) and a related category A standard uncertainty. Assume the correction has a value of 1,02 and the standard uncertainty is 0,01.	0,01	$C_t = 0,5 \text{ v}/k_c$ $= 0,5 \times 10/1,02$ $= 4,90 \text{ m/s}$	0,049
u_B , blockage correction factor, k_b	If a solid object is positioned in the flow of the wind tunnel, the flow will be affected depending on the relation between object size and wind tunnel area. Conditional on the spatial dimensions of the specimen, a raise in the flow velocity occurs in a closed measurement section because of the continuity. In an open measurement section, the current will be widened, which is equivalent to a speed reduction. Assuming the blockage effect is known the uncertainty value of 0,1 % is appropriate. The calibration facility setup report shall present the calculations applied and estimated value of the correction factor and the associated uncertainty.	0,001	$C_f = \text{v}/k_b$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01

Error source u_i	Discussion	Value u_i	Sensitivity value c_i	$u_i c_i$ m/s
u_{k_i} , position correction factor, k_i	An anemometer needs a certain free space (depending on the size of the mounting pipe and the anemometer) below and above it, to experience the same flow conditions as in free atmosphere. Therefore the centre of the measurement section is not necessarily the best position for the specimen. If the wind tunnel is small and thus the mounting pipe is too short, an error of up to 2 % may occur. Only from a certain lengths of the mounting pipe, the influence begins to decrease. This free length amounts to approximately 50 cm above the base plate. Assuming the position effect is known, the uncertainty value of 0,1 % may be appropriate.	0,001	$C_P = v/k_p$ =10 m/s/1,001 ≈ 10 m/s	0,01
u_p , position correction factor, k_p	The flow around the anemometer exerts some influence on the flow around the reference pitot tube. Assuming the influence effect is known, the uncertainty value of 0,1 % of the effect may be appropriate.	0,001		
u_{FD} , flow correction factor, k_{FD}	Mostly, anemometers are mounted on measurement masts of considerable length – a situation which cannot be reproduced in the wind tunnel. If an anemometer is mounted on a tube stub and if this stub is mounted in a wind tunnel with an open measurement section, the current can evade downward. This means a loss of impetus for the anemometer and thus a systematic error. By installing a base-plate, this loss can be considerably reduced. Assuming a base-plate is installed, the standard uncertainty value of 0,1 % is appropriate otherwise the influence has to be examined.	0,001	$C_{FD} = v/k_{FD}$ =10 m/s/1,001 ≈ 10 m/s	0,01
$u_{p,t}$ pressure transducer, $K_{p,t}$	The calibration certificate for the pressure transducer shows a maximum uncertainty of 0,5 Pa in the range from 0 Pa to 500 Pa.	0,5 Pa	$c_{p,t} = 0,5 v/K_{p,t}$ = $0,5 \times 10/5\ 000$ = 0,001	0,000 5
$u_{p,s}$ pressure transducer signal conditioning gain, $K_{p,s}$ and $u_{p,d}$ pressure transducer data sampling conversion $K_{p,d}$	The calibration of the equipment used to measure the pressure transducer output shows a maximum uncertainty of 0,000 15 V in the range from 0 V to 10 V.	0,000 15 V	$c_{p,s} = 0,5 v/K_{p,s}$ = $0,5 \times 10/0,01$ = 500	0,010
$u_{T,t}$ ambient temperature transducer, $K_{T,t}$ $u_{T,s}$ temperature signal conditioning gain, $K_{T,s}$ and $u_{T,d}$ temperature signal digital conversion, $K_{T,d}$	The calibration of the equipment used to measure the temperature shows a maximum uncertainty of 0,1 °C in the range from 10 °C to 30 °C.	0,1 °C	$c_{T,t} = 0,5 v/K_{T,t}$ n/a	0,001
u_h pitot tube	The head coefficient of a pitot tube depends	0,000 997	$C_h = -0,5 v/C_h$	0,005

Error source u_i	Discussion	Value u_i	Sensitivity value c_i	$u_i c_i$ m/s
head coefficient, C_h	upon the angle of attack of the wind. Two error sources are possible, one related to the accuracy with which the pitot tube is set up in alignment with the mean flow direction, and the other due to turbulent variations in instantaneous flow direction. Assume the nominal head coefficient, C_h , is 0,997, and assume also that it is possible to deduce that the standard deviation on angle of attack is 2° . Relevant ISO standards suggest this will give rise to a 0,1 % change in head coefficient.		$= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	
u_{pcal} pitot tube calibration	From the calibration certificate of the pitot tube, an uncertainty of 0,25 % in the range of 4 m/s to 16 m/s may be used.	0,002 5	$C_{\text{ph}} = -0,5 v/C_h$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	
$u_{\text{B,t}}$ sensitivity of barometer, $K_{\text{B,t}}$, $u_{\text{B,s}}$ signal conditioning gain on barometer, $K_{\text{B,s}}$ and $u_{\text{B,d}}$ digital conversion of barometer signal, $K_{\text{B,d}}$	The calibration of the barometer shows a maximum uncertainty of 0,5 hPa in the range from 900 hPa to 1 100 hPa.	0,5 hPa	$c_{\text{B,t}} = -0,5 v/k_{\text{B,t}}$	
s_A statistical uncertainty in the mean of the wind speed time series	Assume the turbulence intensity is 2 %, and that 2 Hz sampling over 30 s is used, giving 60 samples. The standard uncertainty in the mean value of 10 m/s is then given by $\sqrt{1/60 \cdot 0,02 \cdot 10}$	0,026	1	0,026
u_{p} humidity correction to density, k_p or u_{φ} relative humidity, φ	The calibration of the relative humidity measurement equipment shows an uncertainty of less than 2 % in the range 10 to 95 %. A value of 2 % is selected for the calculation. $c_{\varphi} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial k_p} \cdot \frac{\partial k_p}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \frac{\bar{v}}{k_p} 0,378 \frac{P_w}{B}$ At 15 °C, $P_w = 1\,700$ Pa and assuming $B = 1013$ mbar = 101 300 Pa, k_p is evaluated as 0,997 and c_{φ} (at 10 m/s) is 0,032.	$u_{\varphi} = 0,02\% \text{RH}$	$c_p = 0,032$	0,001

The combined standard uncertainty can be obtained by taking the root mean square of the contributory uncertainties in the right hand column. For the values which have been dealt with, this amounts to 0,06 m/s.

The example shows that category B error is liable to dominate. Extending the calibration period can help reduce the category A uncertainty, but will have no effect on category B. Furthermore, category B error sources, although not correlated with one another for a particular wind speed, are fully self-correlated across wind speeds, meaning that good apparent calibrations (good straight lines) can be obtained, whilst still retaining significant uncertainty.

Annex G

(normative)

Mounting of instruments on the meteorological mast

G.1 General

Appropriate arrangement of instruments on the meteorological mast is important for accurate wind turbine testing. The arrangement of anemometers for power performance tests shall include a primary hub height anemometer and a control anemometer. The purpose of the control anemometer is to provide a means of in-situ consistency checking of the primary hub height anemometer as described in Annex K. Before using an anemometer classified for power performance tests, it is recommended that the geometry of the anemometer is checked with the geometry description that corresponds to the anemometer type on which the classification was made. In particular, the anemometer shall be located to minimize flow distortions, especially from mast and boom influences. When minimal flow distortion across a wide wind direction range is required, then this is obtained with a single top-mounted anemometer. However, a side-by-side arrangement of two top-mounted anemometers provides redundancy and a robust method of anemometer consistency checking with only marginally increased flow distortion if both adequate horizontal separation and a stable mounting structure for the anemometers are achieved. When anemometers are mounted on side booms at elevations below the meteorological mast top, flow distortion from both the meteorological mast and the boom is significant and shall be taken into account. Irrespective of the type of mounting arrangement, care shall be taken to ensure that the boom structure is sufficiently stable to avoid significant vibrations. Those other instruments on the meteorological mast which are required to be mounted close to hub height (control anemometer, wind vanes, temperature and pressure sensors) should be mounted in a way that avoids interference with the primary anemometer.

G.2 Single top-mounted anemometer

To achieve negligible flow distortion of the wind speed measurements over a wide wind direction range, a single top-mounted anemometer is the ideal configuration. Where this configuration is adopted all provisions of this section shall be met. However, careful consideration should be given to whether sufficiently robust anemometer consistency checks against a lower elevation anemometer can be achieved with this configuration. This is particularly the case where the meteorological mast is of large cross-sectional area and as a consequence the lower anemometer is subject to more significant meteorological mast interference effects than the top-mounted anemometer or in cases where large variations in wind shear are experienced.

The anemometer shall be supported such that the anemometer cups²⁹ are at least 1,5 m above the meteorological mast and any other sources of flow disturbance and such that no parts of the support structure or meteorological mast shall extend outside of a 11:1 half cone³⁰ whose vertex is coincident with the anemometer cups. The anemometer shall be mounted on a round vertical tube of the same ($\pm 0,1$ mm) outer diameter as used during calibration (and classification), but of no larger diameter than the body of the anemometer. The combined length of the tube and anemometer (measured to the anemometer cups) shall be at least 0,75 m. Furthermore the anemometer shall be held steady, which may necessitate the mounting of the small-diameter vertical tube concentric with another tube of larger

²⁹ Where the anemometer is an allowable type of anemometer other than a cup anemometer (e.g. an ultrasonic anemometer), then “cups” should be interpreted as “sensor measuring elements” throughout this annex.

³⁰ The cone is defined such that the base of the cone is of diameter equal to the characteristic width (maximum width of the mast or protrusions for a distance of 4 m below the cups) of the mast and the height of the cone equals 11 times the radius of the cone base.

diameter to provide a stable structure. This additional tube cannot be of greater diameter than the anemometer body for a height of 1,5 m below the cups. The bracket connecting the anemometer to the vertical tube shall be compact, smooth, and symmetrical. Where the anemometer is designed for internal cable routing in the support tube, then the cable shall be routed inside the vertical tube. For other configurations (e.g. pig tail), then the cable should be spirally wound around the vertical tube (approximately 3 turns/m or similar to that used during calibration and classification). The anemometer should be calibrated with the same cable attachment and routing configuration as is to be used in the field. The anemometer (and mounting tube) inclination from vertical shall be less than 2°. It is recommended that this is verified by measurement. No other instruments shall be positioned closer than 1,5 m to the anemometer cups nor outside of the 11:1 half cone to a distance of at least 4 m below the anemometer cups. In this case, the control anemometer for the top-mounted anemometer shall be a side-mounted anemometer located at least 4 m and no more than 6 m below the top-mounted anemometer and otherwise satisfying the requirements for side-mounted anemometers in Clause G.4. Figure G.1 shows an example of a top-mounting configuration.

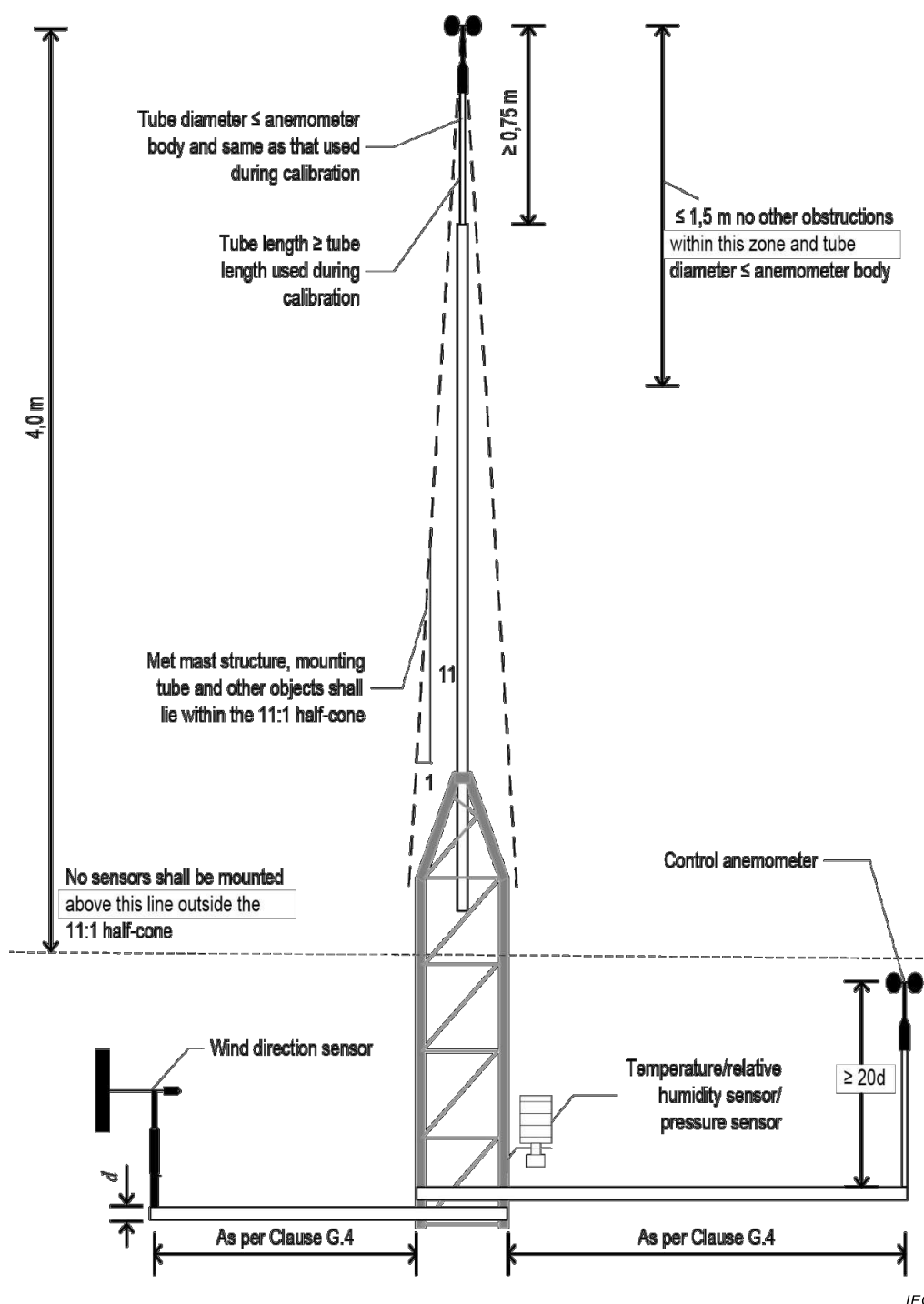
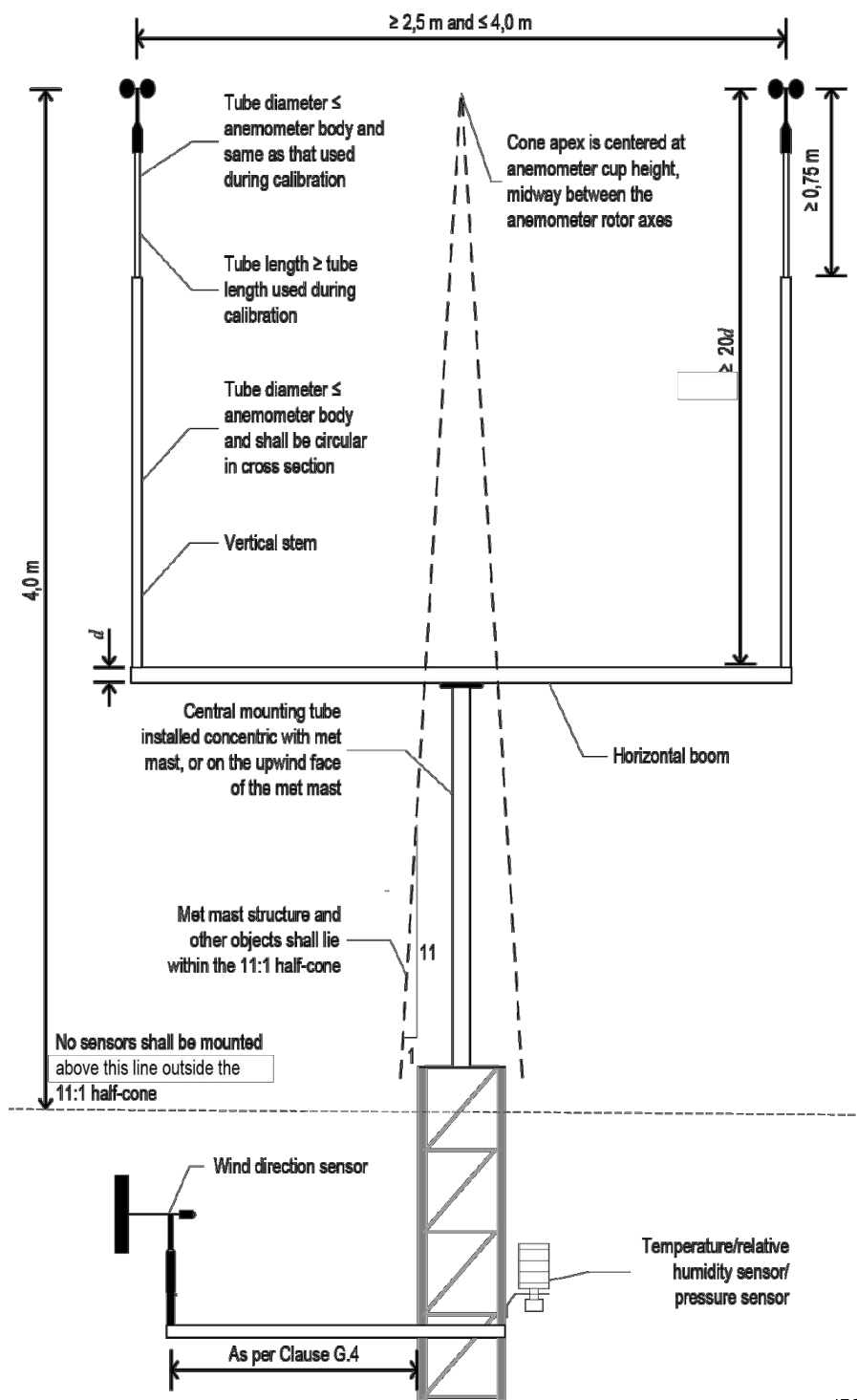


Figure G.1 – Example of a top-mounted anemometer and requirements for mounting

G.3 Side-by-side top-mounted anemometers

In the side-by-side arrangement all mounting conditions in Clause G.2 shall be met in addition to those specified here. The anemometer cups shall be mounted above the boom by a minimum of 20 times the boom diameter, but 25 times the boom diameter is recommended. The boom, consisting of both the horizontal portion and vertical stems, shall be of round cross-section. The anemometers shall be separated by at least 2,5 m and no more than 4,0 m. No parts of the meteorological mast shall extend beyond a 11:1 half cone whose vertex is coincident with the midpoint between the cups of the two top-mounted anemometers (the top boom itself is excluded from this requirement provided that it meets the foregoing

dimensional criteria). No other instruments shall be positioned closer than 1,5 m to the anemometer cups nor outside the 11:1 half cone to a distance of at least 4 m below the anemometer cups. Figure G.2 shows an example of a side-by-side configuration. It is recommended that the boom is mounted concentric with the meteorological mast axis or centrally on the upwind side of the meteorological mast. The influence of one anemometer on the other shall be assessed and the measurement sector restricted such that the overall uncertainty of the wind speed measurement remains within the desired limits. The uncertainty due to flow distortion from other instruments, the meteorological mast and booms shall be determined.



IEC

Figure G.2 – Example of alternative top-mounted primary and control anemometers positioned side-by-side and wind vane and other instruments on the boom

G.4 Side-mounted instruments

G.4.1 General

Side-mounted instruments such as anemometers and wind direction sensors are influenced by flow distortion from the meteorological mast, boom and guy wires. The influence of a round tubular boom is 0,5 % at a separation distance of 20 boom diameters above the boom. Flow distortion at the anemometer cup location due to booms should be kept below 0,5 %. The

anemometer shall be mounted on a round vertical tube of the same ($\pm 0,1$ mm) outer diameter as used during calibration (and classification), but of no larger diameter than the body of the anemometer. Wind direction sensors should be mounted at a distance from the meteorological mast of no less than half of that recommended for anemometers. There shall be at least 20 boom diameter vertical separation from side-mounted instruments to booms above. This separation requirement applies where a side-mounted anemometer is being used as a control anemometer for another side-mounted anemometer at a different height as well as to the case where side-mounted anemometers at different heights are being used for wind shear measurement. In the case where the side-mounted anemometer is being used as a control anemometer to another side-mounted anemometer, the vertical separation to the primary instrument shall be in the range 4 m to 6 m where the side booms are on the same side of the mast as each other and pointing in the same direction. Alternatively the control anemometer side boom may be mounted at the same height as the other side-mounted anemometer but pointing in a different direction such that the flow distortion requirements at both anemometer locations are satisfied within the measurement sector.

An anemometer operating in the wake of the meteorological mast is highly disturbed. Measurements obtained in this condition shall not be used in the power performance analysis. Flow distortion upstream of the meteorological mast can be significant. Adequate separation shall be allowed between the anemometer and the meteorological mast to keep meteorological mast flow distortion below 1 %. Guidance for appropriate anemometer to meteorological mast separation is given in G.4.2 and G.4.3.

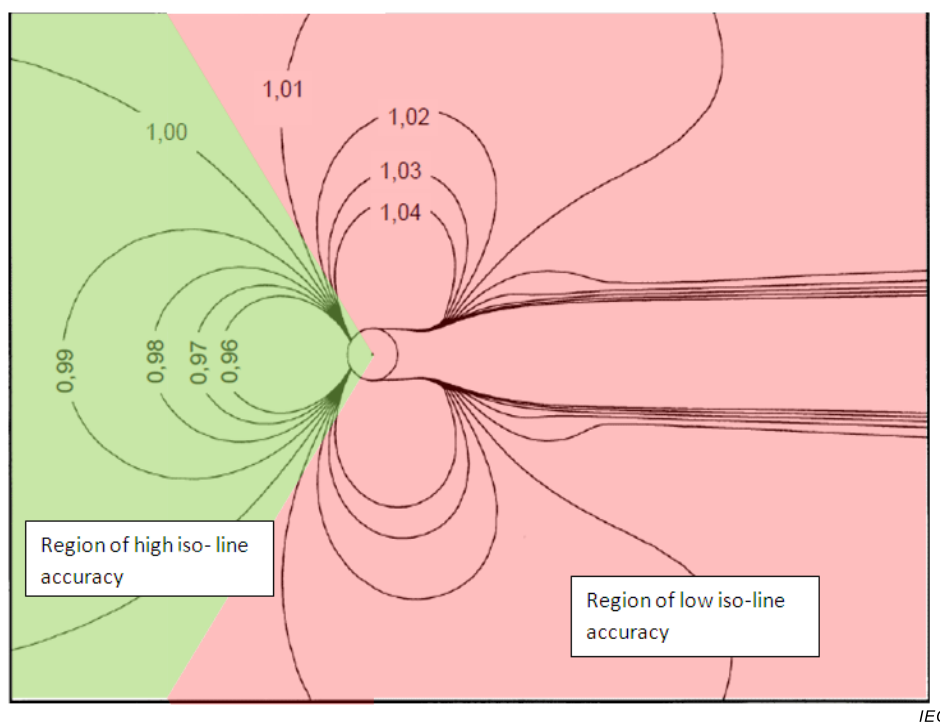
Wakes from meteorological mast guys can have a strong influence on anemometers over surprisingly long distances. Location of anemometers downstream of guys shall be avoided.

It is largely up to the user to determine what degree of disturbance and hence uncertainty is acceptable, but a suitable aim should be to avoid meteorological mast and boom induced flow distortions greater than 1 % and 0,5 %, respectively.

Meteorological masts can either be of cylindrical or lattice construction. The required separation of the anemometer from the meteorological mast depends upon the type of meteorological mast and solidity.

G.4.2 Tubular meteorological masts

An approximation of the flow disturbance in the vicinity of a tubular meteorological mast can be obtained from Figure G.3. This figure shows an iso-speed plot of the flow around a tubular meteorological mast from a Navier-Stokes analysis. The least disturbance can be seen to occur if facing the wind at 45° . More generally, it can be seen that there is a retardation of the flow upwind of the meteorological mast, acceleration around it, and a wake behind it. Due to the complexity of the flow in the mast wake influenced region, Figure G.3 is to be considered accurate only for the upwind zone of least disturbance as indicated by the green shading in the figure.



NOTE The speed is normalised by free-field wind speed (from the left); analysis by 2 dimensional Navier-Stokes computations for which the green shaded region on the left is considered accurate and the red shaded region on the right inaccurate due to inaccuracies modelling flow in and behind the separation zone.

Figure G.3 – Iso-speed plot of local flow speed around a cylindrical meteorological mast

It is evident from Figure G.3 that for an anemometer mounted within the $\pm 45^\circ$ sector relative to the wind direction on the upwind side of the meteorological mast that the greatest distortion of the wind speed relative to free stream occurs when the anemometer is directly upwind of the meteorological mast. Figure G.4 shows the relative wind speed as a function of distance upwind of the meteorological mast³¹.

³¹ Note that wind speed distortion may be higher than shown in Figure G.4 if winds approach from angles greater than 45° from the anemometer – mast alignment.

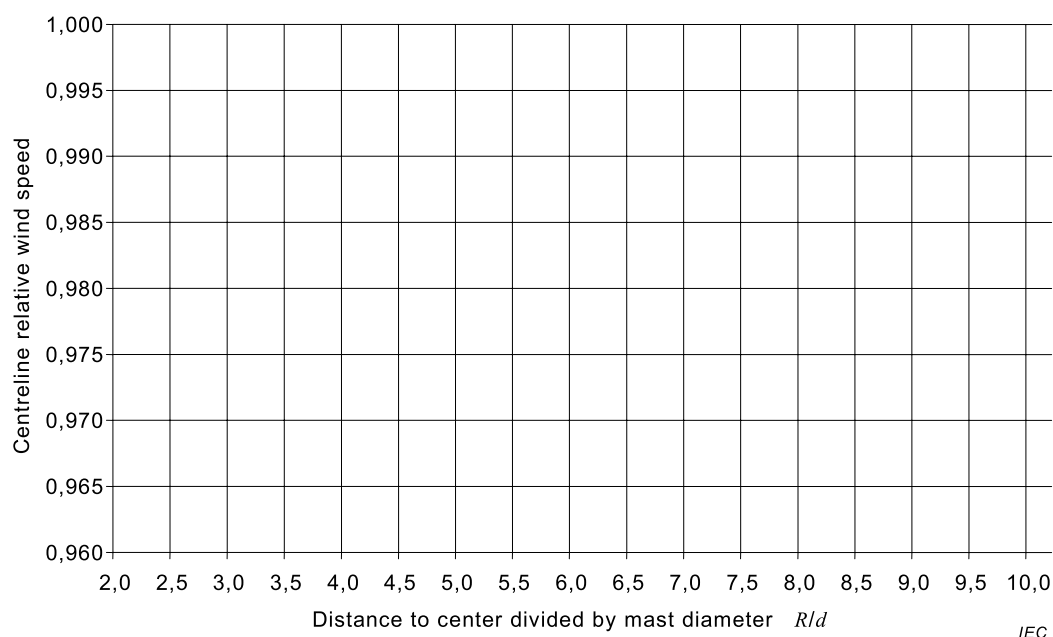
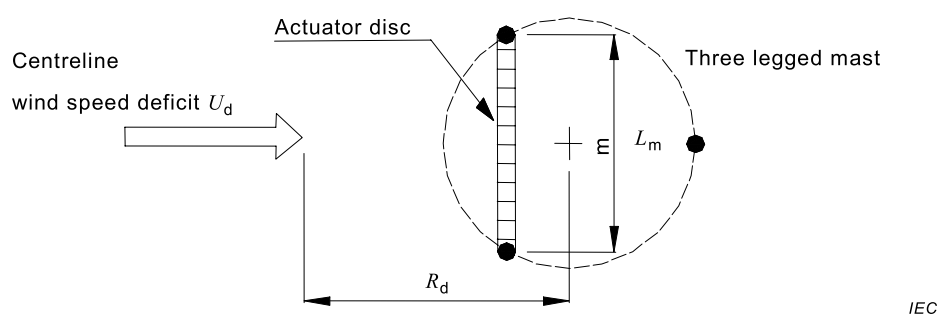


Figure G.4 – Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a tubular meteorological mast and meteorological mast diameter d

A 99,5 % relative wind speed is seen to occur at R_d/d of 8,2. The corresponding value for a 99 % relative wind speed is 6,1.

G.4.3 Lattice meteorological masts

Analysis of the flow around a lattice structure can be based upon a combination of actuator disc and Navier-Stokes theory and analysis. The degree to which flow is disturbed by the meteorological mast is a function of the solidity of the meteorological mast, the drag of the individual members, the orientation of the wind and the separation of the measurement point from the meteorological mast. Figure G.5 shows the dimensions of interest on a top-view of a triangular lattice meteorological mast.



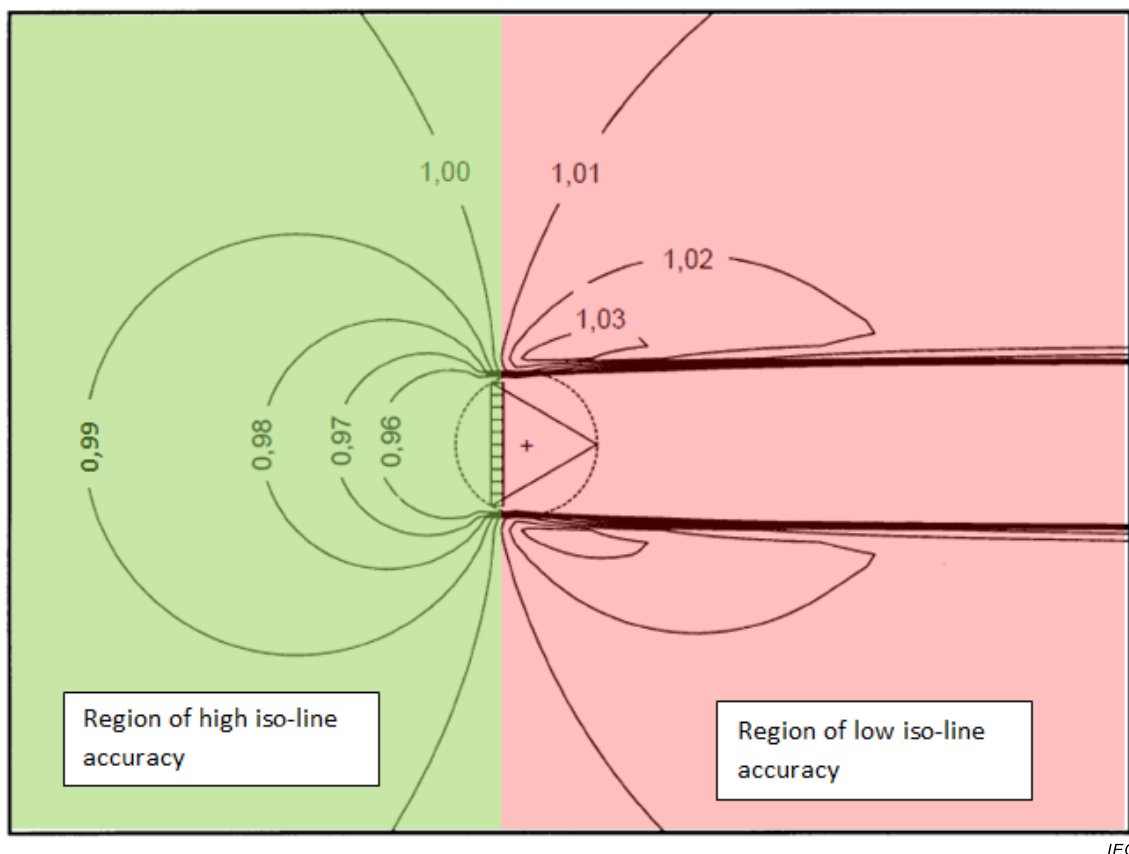
NOTE The figure shows the centreline wind speed deficit, the actuator disc representation of the meteorological mast with the leg distance L_m and distance R_d from the centre of the meteorological mast to the point of observation.

Figure G.5 – Representation of a three-legged lattice meteorological mast

The flow distortion is a function of the assumed thrust coefficient, C_T , which in turn depends upon the solidity of the meteorological mast and the drag on the individual members. C_T can

be regarded as the total drag force per unit length of the mast, divided by the dynamic pressure and the leg distance L_m ³².

Figure G.6 shows the computed flow around a lattice meteorological mast having a C_T of 0,5. At typical distances of the anemometer $R_d > 2$ times the meteorological mast leg distance, this flow disturbance is very little affected by meteorological mast orientation (whether the face or a corner is oriented into the wind), and it can therefore be assumed to be the same. However, Figure G.6 is to be considered accurate only for the upwind zone of least disturbance as indicated by the green shading in the figure.



NOTE The speed is normalised by free-field wind speed (from the left); analysis by 2 dimensional Navier-Stokes computation and actuator disc theory for which the green shaded region on the left is considered accurate and the red shaded region on the right inaccurate due to inaccuracies modelling flow in and behind the separation zone.

Figure G.6 – Iso-speed plot of local flow speed around a triangular lattice meteorological mast with a C_T of 0,5

³² The leg distance shall represent the face width. For significant leg diameters (leg diameter > 5 % of face width) one leg diameter should be added to the distance between the leg centres to get the leg distance.

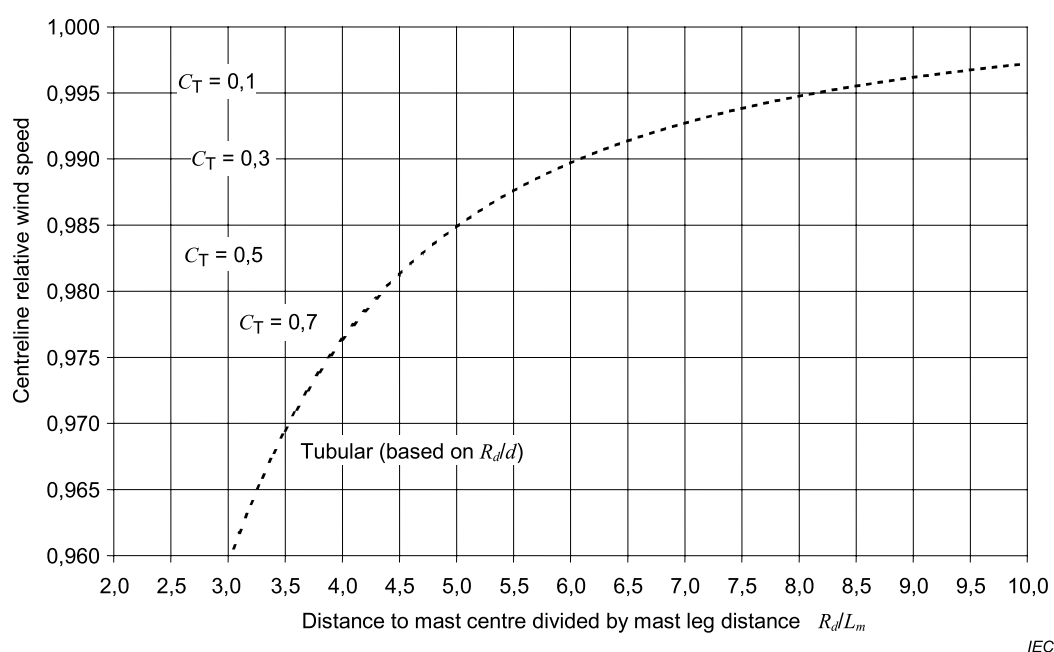


Figure G.7 – Centreline relative wind speed as a function of distance R_d from the centre of a triangular lattice meteorological mast of leg distance L_m for various C_T values

When the flow direction is perpendicular to a meteorological mast face, minimum distortion is obtained when the anemometer is placed at an angle of 90° to the flow direction. Otherwise, the flow distortion may be determined by considering the upwind deficit as a function of distance. Figure G.7 shows the computed centreline relative wind speeds for lattice towers having various C_T values. Note, however, that wind speed distortion may be higher than shown in Figure G.7 if winds approach from angles greater than 100° from the anemometer boom alignment.

The equation below may be used to estimate the centreline wind speed deficit U_d as a function of C_T and R_d/L_m :

$$U_d = 1 - \left(0,062C_T^2 + 0,076C_T \right) \cdot \left(\frac{L_m}{R_d} - 0,082 \right) \quad (\text{G.1})$$

C_T can be estimated from local building codes or, within the ranges specified, from Table G.1. In this table, the solidity S is defined as the ratio of the projected area of all structural members on the side of the meteorological mast to the total exposed area.

Table G.1 – Estimation method for C_T for various types of lattice mast

Type of mast	Plan section	Expression for C_T	Valid range
Square cross-section, members with sharp edges		$4,4(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,5$
Square cross-section, round members		$2,6(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,3$
Triangular cross-section, round members		$2,1(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,3$

Alternatively, if the desired maximum centreline wind speed deficit is specified, the distance R_d may be obtained from the following equation:

$$R_d = \frac{L}{\frac{1 - U_d}{(0,062C_T^2 + 0,076C_T)} + 0,082} \quad (\text{G.2})$$

For a lattice meteorological mast with a C_T of 0,5 and a 99,5 % centreline wind speed deficit, R_d shall be 5,7 times the meteorological mast leg distance L_m . A wind speed deficit of 99 % will reduce the distance R_d to 3,7 times the meteorological mast leg distance.

The above equations and charts represent somewhat idealised meteorological mast geometry and flow conditions. It should be noted that the flow interference will be significantly more complex in those cases where secondary support structures such as lattice work, cross-bracing, cable ladders, flanges and attachment brackets are also present at or near the height level of the anemometer or where the flow direction is not parallel to the meteorological mast cross section axis of symmetry. Figure G.8 illustrates the CFD derived flow (from the left) where the relative position and hence influence of the cross-bracing on the flow distortion changes with height. Note that the distortion is asymmetric but that the optimum location for minimum flow distortion is still at 90° to the flow direction.

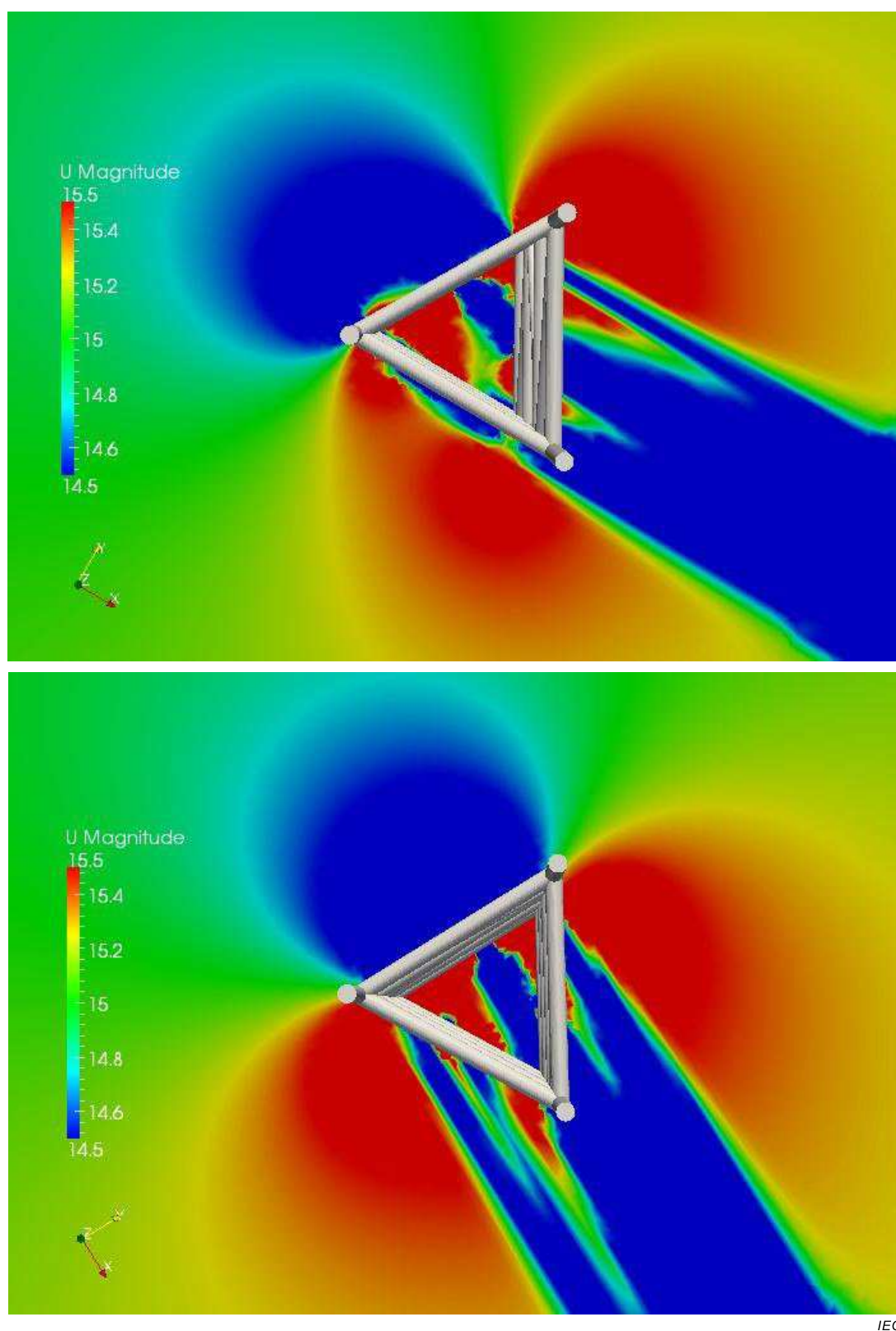


Figure G.8 – 3D CFD derived flow distortion for two different wind directions around a triangular lattice meteorological mast ($C_T = 0,27$) – For flow direction see the red arrow lower left in each figure

G.5 Lightning protection

A lightning finial (attractor) can protect the top-mounted instruments. If lightning protection is installed, a number of precautions shall be taken. The lightning finial should be mounted at the top of the meteorological mast in such a way that:

- a) the anemometer is separated horizontally by at least 30 times the finial diameter from the finial;
- b) the anemometer is not in the wake of the finial when the wind is in the measurement sector;

Where these conditions cannot be met, then the flow distortion on the anemometer shall be assessed and an additional uncertainty shall be added.

G.6 Mounting of other meteorological instruments

The control anemometer should be located as close to the primary anemometer as possible, whilst still satisfying the minimum separation requirements of Clauses G.2 to G.4, in order to provide a good correlation between the two instruments during the test. This correlation should be validated to ensure that the primary anemometer does not change its calibration during the test. However, the control anemometer shall not interfere with the primary anemometer and shall also be free of flow disturbance from other instruments.

The wind direction sensor shall be mounted 4 m to 10 m below the primary anemometer. It shall be mounted so that flow distortion effects are minimized with respect to the measurement sector. The horizontal separation of the wind direction sensor from the meteorological mast should be at least half that required for an anemometer.

Except in the case where a meteorological mast shorter than hub height is being used in conjunction with a remote sensing device, temperature, humidity and pressure sensors shall be located within 10 m of the hub height on the meteorological mast at a minimum of 1,5 m below the primary anemometer whilst meeting the mounting requirements for other instruments defined in Clauses G.2 and G.3. The temperature sensor shall be mounted in a radiation shield. The pressure sensor may be mounted in a weatherproof box. However, care should be taken to ensure that the box is properly vented so that pressure readings are not influenced by the pressure distribution around the box.

If the meteorological mast available for the power performance test is shorter than hub height (specifically when a shorter meteorological mast is used in conjunction with a remote sensing device as defined in Annex L), temperature, humidity and pressure sensors shall be located at a height within 1,5 m to 10 m of the primary anemometer. Atmospheric pressure shall be adjusted to hub height following this standard. Furthermore, the air temperature shall be adjusted to hub height assuming that the atmosphere varies according to ISO 2533:1975. Alternatively a temperature sensor shall be mounted on the wind turbine nacelle. The sensor shall be mounted at least 1 m above the nacelle and upwind of any existing ventilation systems.

Examples of suitable arrangements for other meteorological instruments and top-mounted anemometers are shown in Figure G.1 and Figure G.2.

Annex H (normative)

Power performance testing of small wind turbines

H.1 General

Small wind turbines (as defined by IEC 61400-2) require special provisions for power performance testing. In particular, wind turbines used to charge batteries shall be tested in a way that is representative of normal operation but that reduces or eliminates the influence of the particular battery configuration and condition used during testing, and wind turbines that use inverters for grid connection shall be tested in conjunction with those inverters to give results representative of normal operation. In all cases the relevant power is useful power to the consumer, thus power is the power injected into the grid for grid connected wind turbines, similarly power delivered to the batteries for battery charging wind turbines. When testing a small wind turbine, all requirements described in this standard shall be met with the following additions and changes.

H.2 Definitions

Maximum power, P_{60} : maximum one-minute average power output a wind turbine in normal steady-state operation will produce (peak instantaneous power output can be higher).

Reference power: the averaged power level in the 11 m/s wind speed bin.

Reference annual energy production: The *AEP* measured at 5 m/s annual average wind speed, Rayleigh distributed, using the sea level density corrected power curve.

H.3 Wind turbine system definition and installation

With respect to 6.2, the following is required:

- a) When characterising battery charging performance, the wind turbine generator system shall include the wind turbine, wind turbine tower, wind turbine controller, wiring between the wind turbine and the load, and charge controller, which is a voltage protection device that reduces wind turbine power output when batteries are fully charged. It may include a dump load that is used to dissipate energy from the wind turbine when the batteries are fully charged. The wind turbine generator system does not include a battery bank because it is considered part of the load. Other energy storage devices may be substituted for batteries throughout this clause;
- b) when characterising system output to a grid, the wind turbine generator system shall include the wind turbine, wind turbine tower, wind turbine controller, wiring between the wind turbine and the load, and any additional controllers. In addition, the system may include a voltage inverter. If a transformer is installed between the voltage inverter and the grid, it may be considered as either part of the wind turbine generator system or the load. If the grid-connected wind turbine system incorporates a battery bank and/or dump load, it shall be considered part of the system;
- c) the wind turbine shall be connected to an electrical load that is representative of the load for which the wind turbine is designed. In the case of battery charging applications, the load consists of a battery bank, a voltage regulator, and a means to dissipate the power that passes through the voltage regulator (or dump load). In the ideal test set-up, the battery bank does not store energy produced by the wind turbine. Rather all wind turbine output is routed through the voltage regulator. Therefore, the battery bank may be smaller than typically recommended for the wind turbine as long as voltage at the connection of the wind turbine to the load can be maintained within the specifications stated below;

- d) the wind turbine shall be installed using the manufacturer's specified mounting system. If a wind turbine is not supplied with a specific mounting system, the wind turbine generator should be mounted at a hub height of at least 10 m;
- e) in order to minimize differences in results due to wiring between the wind turbine and the load, the total wire run length, measured from the base of the tower to the load, shall be at least 8 rotor diameters. Wiring between the small wind turbine and the load shall be in accordance with the manufacturer's specifications for this wire run length. If the specifications provide for a range of wire sizes, wires shall be sized as close as possible to the average of that range. If no specifications are provided, the wiring shall be sized so that voltage drop between the wind turbine generator and the load is equivalent to 10 % of nominal voltage at rated power;
- f) the voltage regulator shall be capable of maintaining voltage at the connection of the wind turbine to load within 10 % of the settings given in Table H.1 over the full range of power output of the wind turbine. The 1-minute average of the load voltage shall be within 5 % of the settings given in Table H.1 to be included in the usable data set.

H.4 Meteorological mast location

With respect to 6.3.2 the following is required:

- a) If it is more practical to mount the anemometer on a long boom that is connected to the wind turbine tower, a separate meteorological mast is not required. To minimize the flow distortion on the small wind turbine rotor from the wake from the anemometer, the wind vane and their mounting hardware, all such components shall be located at least 3 m away from any part of the wind turbine rotor. In addition, the anemometer mounting should be configured to minimize its cross-sectional area above the level that is 1,5 rotor diameters below hub height. The boom shall be installed such that structural vibrations are not introduced into the wind speed signal;
- b) for vertical axis wind turbines hub height is defined as the height of the centroid of the swept area of the wind turbine rotor;
- c) for vertical axis wind turbines the distance between wind turbine and meteorological mast is illustrated in Figure H.1.

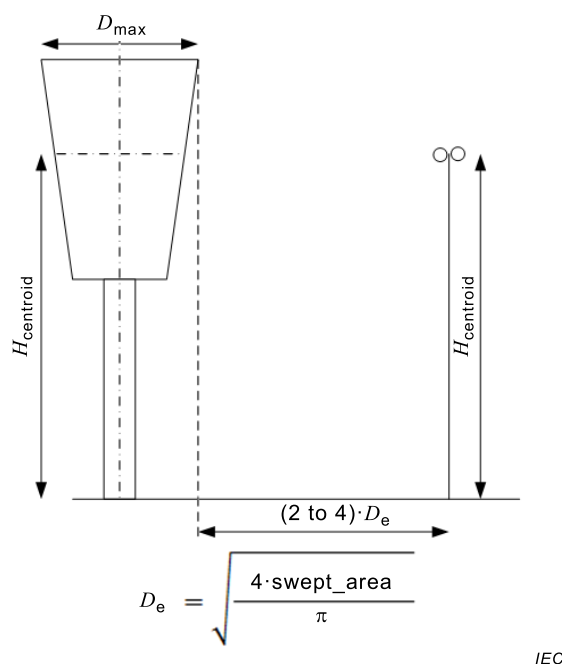


Figure H.1 – Definition of hub height and meteorological mast location for vertical axis wind turbines

H.5 Test equipment

- a) In 7.1 when measuring DC outputs for battery charging wind turbines with a swept area of 40 m² or less, the use of measurement equipment with an accuracy of 2 % or better is permitted for the purposes of measuring current and power, rather than the 0,5 % accuracy referred to in 7.1;
- b) in 7.1: wind turbine output power shall be measured at the connection to the load as defined in Clause H.3;
- c) also in 7.1: in addition to electric power, voltage at the connection to the load shall be measured to ensure compliance with the requirements listed in Clause H.3;
- d) also in 7.2.2: the anemometer mounting guidance provided in Annex G should be followed. If deviations are made the reason for doing so needs to be documented in the test report and additional uncertainty shall to be added to the analysis. In extreme cases, it is permissible to temporarily use an anemometer other than the control anemometer if it can be demonstrated that a good correlation exists between the control anemometer and this third anemometer. Additional uncertainty will have to be used in the analysis to accommodate for the uncertainties in the correlation;
- e) also in 7.2.3: anemometer shall be mounted at the top of a meteorological mast at hub height ± 2 % relative to the ground at the meteorological mast;
- f) in 7.2.6: no wind shear needs to be measured;
- g) in 7.4: measurement of relative humidity and correction for it is optional;
- h) also in 7.4: the air temperature sensor, air pressure sensor, and humidity sensor, if used, shall be mounted so that they are at least 1,5 rotor diameters vertical distance from hub height and within 100 m horizontal distance of the hub;
- i) in 7.7: monitoring of small wind turbine status is recommended but is not mandatory.

H.6 Measurement procedure

- a) in 8.2: if the wind turbine's charge controller reduces wind turbine output at the optional high voltage setting, the charge controller may be adjusted to a higher voltage. If the

- charge controller is adjusted, the test report shall document the settings before and after adjustment. Any other adjustments to the wind turbine's controls shall be clearly reported;
- b) in 8.3: pre-processed data shall be of 1 min duration. All subsequent references to 10-min data sets in the standard shall apply to 1 min data sets when testing small wind turbines;
 - c) in 8.4: add bullet for data rejection
 - 1 min average of the load voltage is not within 5 % of the settings given in Table H.1;
 - d) in 8.5: the database shall be considered complete when it has met the following criteria:
 - 1) each wind speed bin between 1 m/s below cut-in and 14 m/s shall contain a minimum of 10 min of sampled data;
 - 2) the total database contains at least 60 h of data with the small wind turbine within the wind speed range defined in bullet 1);
 - 3) in the case of furling wind turbines, the database should include completed wind speed bins characterizing performance when the wind turbine is furled.
 - e) it is recommended that additional performance data be obtained to quantify the effect that changes of battery bank voltage have on wind turbine performance. These additional power curves should be obtained by setting the battery bank voltage to the optional low and high settings listed in Table H.1, and by obtaining at least 30 h of data using 1-min pre-averaging. When reporting these power curves, the tables and graphs shall clearly indicate that they show performance at optional low and high voltage settings and shall indicate those voltage settings. It is recommended that a single graph be used to show the variation of power with wind speed and battery bank voltage.

Table H.1 – Battery bank voltage settings

Nominal voltage V	Required setting V	Optional low setting V	Optional high setting V
12	12,6	11,4	14,4
24	25,2	22,8	28,8
36	37,8	34,2	43,2
48	50,4	45,6	57,6
Other	2,1*	1,9*	2,4*
* Volts per cell			

H.7 Derived results

- a) in 9.1: for wind turbines with passive power control such as furling or blade fluttering, wind speed shall be sea level normalised using Equation (14) (wind speed normalisation), Equation (13) (power normalisation), or an alternative method. Documentation shall be provided to justify the use of an alternative method; However, if the wind turbine is already adjusted to adapt to the site specific air density, this should be reported and no additional normalisation is allowed;
- b) in 9.1.6: for small wind turbines, the turbulence correction is not recommended, however if it is carried out it shall be reported whether the method is applied for 1 min averages instead of 10 min averages of the measured power and wind speed, and either are permitted. If the turbulence correction is applied the power curves both with and without turbulence correction shall be reported and clearly identified;
- c) in 9.3: in cases where the small wind turbine does not shut down in high winds, *AEP* measured and *AEP* extrapolated shall be calculated as though cut-out wind speed were the highest, filled wind speed bin or 25 m/s, whichever is greater.

H.8 Reporting

In Clause 10: in addition to the information listed in Clause 7, the description of the wind turbine and the test set-up shall include:

- a) wiring sizes, conductor material, types, lengths and connectors used to connect the wind turbine to the load;
- b) voltage setting(s) for any over or under-voltage protection devices that are part of the small wind turbine generator system;
- c) nominal battery bank voltage (e.g. 12 V, 24 V, 48 V);
- d) battery bank size (i.e. amp-hour capacity), battery type and age;
- e) description including make, model, and specifications of the voltage regulation device used to maintain the battery bank voltage within specified limits;
- f) reference power;
- g) the calculated annual energy production based on *AEP*-measured and a Rayleigh wind speed distribution with an average wind speed of 5 m/s and the sea level density normalised power curve shall be reported as the Reference Annual Energy;
- h) the 1 min turbulence intensity for each data set (sequential, unbroken, time series) as a scatter plot across the observed wind speed range.

H.9 Annex A – Assessment of influence cause by wind turbines and obstacles at the test site

- a) The requirements in Table A.1 may be relaxed to accommodate small wind turbines but additional uncertainty should be included for the wind speed uncertainty. However, do not disregard other sections of Annex A (i.e. the method for excluded sectors due to obstacles).

H.10 Annex B – Assessment of terrain at test site

- a) In recognition of the typical environments where small wind turbines are installed the maximum slope requirements in Table B.1 may be increased to 10 % for all distances and all directions. However, additional uncertainty in wind speed should be added.

H.11 Annex C – Site calibration procedure

- a) in C.3.2: additional measurements to characterize wind shear are not recommended. This includes vertical wind speed and wind veer measurements;
- b) In Clause C.5: disregard analysis for wind shear and atmospheric stability;
- c) also in Clause C.5: wind shear measurements are not required at both meteorological masts;
- d) also in Clause C.5: for each 1-minute data point, the wind speed ratio shall be calculated, which is the hub height wind speed at the wind turbine meteorological mast location divided by the hub height wind speed at the reference meteorological mast;
- e) in C.5.1 and C.5.2: these subclauses will be disregarded;
- f) in C.5.3: this subclause will be used for site calibration analysis;
- g) for site calibration for small wind turbines, it is acceptable to use the wind turbine support tower rather than a meteorological mast at the wind turbine location, provided that flow distortion requirements are satisfied.

Annex I (normative)

Classification of cup and sonic anemometry

I.1 General

Cup and sonic anemometers are wind measurement instruments that may be used for power performance measurements. In order to transfer traceability they shall be calibrated in a wind tunnel according to Annex F. Wind tunnel calibrations are performed under controlled environmental conditions with a smooth and low turbulent flow. However, during measurements and operation in the field, these instruments are subject to turbulent flow and environmental conditions that can deviate significantly from wind tunnel calibration conditions. The field conditions may significantly influence the instrument characteristics and cause the instrument output to deviate from wind tunnel calibrations. If the ranges of the influential parameters during field operation are determined, then the systematic deviations may be analysed and the deviations in instrument output may be put into a classification scheme.

Known influence parameters on cup anemometer measurements are turbulence, air temperature, air density, and average upflow angle. Known influence parameters on sonic anemometer measurements are wind direction, upflow angle, and air temperature. These influence parameters shall be considered in the classification. Other environmental parameters may influence the instruments. If such influence parameters are known to give systematic deviations, the influence shall be analysed and included in the classification scheme. Furthermore, the combined effect of all influential parameters shall be assessed. The systematic deviations due to influential parameters shall be analysed according to the procedures described in Annex J resulting in a classification specification of the type of anemometer. At least five samples of the anemometer type shall be assessed. Modification of an anemometer type that may influence the output requires a new assessment. Change in geometry of the anemometer type, measurement principle, software algorithm for calculation of the output, software settings, or supporting structure geometry, requires a new assessment.

The classification method only considers normal operation of the sensors. The method does not consider, for example wear, malfunctioning or icing (see Annex O).

I.2 Classification classes

The classification of an anemometer type is divided into five classes dependent on the purpose. Class A, B, C and D are based on predefined terrain and climate ranges, see Table I.1. Class A and C shall be used for terrain that meets the requirements in Annex B and in type A terrain in C.3.1. Class B and D shall be used for terrain that does not meet the requirements in Annex B. Class B and D could be used in terrain type B in C.3.1. If information about the influence parameter ranges during the measurements are available then class S may be used.

Class S is a special class, where the influence parameter ranges may be defined by the user, see Table I.1. This may be for a special climate, for example cold climate conditions, see Annex O. The class S may also be used for uncertainty estimate for a measurement campaign where the influence parameter ranges are determined during the measurements. Class S may be used for measurements in type A, B and C terrain, see C.3.1.

The classification number k shall be used in determination of the wind speed operational characteristics uncertainty, as listed in Annex D (Table D.1).

Annex B provides an assessment of the terrain to evaluate if the flow distortion due to the terrain will be significant. For classification of cup and sonic anemometers, this terrain assessment supports the definition of the classification classes A, B, C and D.

- Class A: Associated with terrain that meets the requirements of Annex B and with general influence parameter ranges for this type of terrain.
- Class B: Associated with terrain that does not meet the requirements of Annex B and with general influence parameter ranges this type of terrain.
- Class C: Same as class A but with temperatures down to –20 °C.
- Class D: Same as class B but with temperatures down to –20 °C.

For terrain or climate that deviates from classes A to D a class S climate may be specified.

- Class S: Associated with conditions that deviates from class A, B, C or D. In this class, the user defines the influence parameter ranges. This may be due to special or user defined terrain or climate conditions.

I.3 Influence parameter ranges

The minimum required influence parameter ranges of cup and sonic anemometer classification are listed in Table I.1.

I.4 Classification of cup and sonic anemometers

The classification of an anemometer is specified by the amount of systematic deviations from calibrated values (calibration according to Annex F) where the systematic deviations are determined for values varying within the influence parameter ranges. For a sonic anemometer and for directional sensitive cup anemometers, a reference direction that is used for calibrations according to Annex F shall be defined for the instrument type. The systematic deviations shall be derived for all values that are relevant for the class determination between min and max values for each parameter. The class number k_n of an anemometer sample number n shall be determined as the maximum systematic deviation from the wind tunnel calibration value, weighted with a wind speed function ε_i :

$$k_n = 100 \cdot \max |\varepsilon_i / w_i| \quad (I.1)$$

where

- k_n is the class number of anemometer sample number n ($n=1\dots 5$ or more);
- w_i is a weighting function in m/s that defines the deviation envelope, see Equation (I.2);
- ε_i is the deviation in m/s for influence parameter combination i .

The weighting function w_i averages the influence of absolute and relative deviations³³:

$$w_i = 5 \text{ m/s} + 0,5 \cdot U_i \quad (I.2)$$

where

- U_i is the wind speed in m/s for influence parameter combination i .

³³ A class number of 1 corresponds to 1 % at 10 m/s but more than 1 % below 10 m/s and less than 1 % above 10 m/s.

Table I.1 – Influence parameter ranges (10 min averages) of Classes A, B, C, D and S

	Class A Terrain meets requirements in Annex B	Class B Terrain does not meet requirements in Annex B	Class C Terrain meets requirements in Annex B	Class D Terrain does not meet requirements in Annex B	Class S³⁴ Special class with user defined ranges
	Range	Range	Range	Range	Range
Wind speed V (m/s)	4 to 16	4 to 16	4 to 16	4 to 16	4 to 16
Turbulence intensity	0,03 to 0,12 + 0,48/V	0,03 to 0,12 + 0,96/V	0,03 to 0,12 + 0,48/V	0,03 to 0,12 + 0,96/V	User defined
Turbulence ³⁵ structure $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	1/0,8/0,5*	1/0,8/0,5*	1/0,8/0,5*	1/0,8/0,5*	User defined or 1/0,8/0,5*
Air temperature (°C)	0 to 40	–10 to 40	–20 to 40	–20 to 40	User defined
Air density (kg/m ³)	0,9 to 1,35	0,9 to 1,35	0,9 to 1,35	0,9 to 1,35	User defined
Average upflow angle (°)	–3 to 3	–15 to 15	–3 to 3	–15 to 15	User defined
Wind direction (°) ³⁶	Cups and sonics: 0° to 360°	Cups and sonics: 0° to 360°	Cups and sonics: 0° to 360°	Cups and sonics: 0° to 360°	Cups: 0° to 360° Sonics: user defined
* A non-isotropic Kaimal turbulence spectrum with turbulence length scale 350 m.					

For the five anemometer samples being tested for classification, the class is determined by the average of the k values plus half the range divided by $\sqrt{3}$ assuming a rectangular distribution (see Equation (I.3)).

$$k = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 k_n + \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{I.3})$$

A classification, referring to a certain class, is expressed by kA , kB or kS , for example 1,7A or 2,5S. The operational characteristics standard uncertainty (see Table D.1) of a cup or sonic anemometer may be derived from the classification assuming a rectangular uncertainty distribution, in which case the standard uncertainty to be used in the power performance uncertainty assessment is:

$$u_{v2j} = (0,05 \text{ m/s} + 0,005 \cdot U_j) \cdot k \cdot \sqrt{3} \quad (\text{I.4})$$

³⁴ The influence parameter ranges determined during a power performance measurement includes some parameters that are measured as part of the performance measurement: wind speed, turbulence, air temperature, air density. The upflow angle may be determined during a site calibration by mounting a bi-vane or three-dimensional sonic anemometer at hub height on the meteorology mast temporarily mounted at the wind turbines foundation. Upflow angle on the turbine may be determined with a spinner anemometer.

³⁵ For generation of artificial wind, see for example Clause J.4.

³⁶ If a cup anemometer is directional sensitive (should be investigated on at least one sample), then directivity shall be included in the classification. For sonic anemometers directivity shall always be included in the classification, but for class S the wind direction range may be defined by the user.

An example of a classification is described in Annex J.

I.5 Reporting format

Classification reporting of the wind speed sensor shall specify all relevant details of the sensor, including all settings. Documentation of the class of a sonic anemometer shall specify the programmed configuration for which the classification is valid.

Relevant documentation shall be provided with detailed information on the procedures followed, the measurements performed as background for the classification, and documentation of the facilities and instruments used.

Annex J

(normative)

Assessment of cup and sonic anemometry

J.1 General

Assessment of anemometry for classification shall be derived from traceable wind tunnel tests, other laboratory tests and associated modelling of anemometer characteristics. A thorough assessment method should also include verification field tests.

An assessment of a type of cup or sonic anemometer shall include verified procedures to determine the influence of the following basic characteristics (also note Table I.1):

- tilt angular response characteristics;
- yaw angular response characteristics;
- temperature induced effects on the anemometer performance.

Additionally, for cup anemometers the following characteristics shall be assessed:

- dynamic effects due to rotor torque characteristics.

Clause J.2 describes procedures for measuring anemometer characteristics. Clause J.3 describes a method for classification of cup anemometers with an example and Clause J.4 describes a method for classification of sonic anemometers. An actual assessment shall be based on the methodologies in Clauses J.3 and J.4, but could also be based on other assessment methods, as long as they include verified procedures to incorporate influence of the parameters in Table I.1. Clause J.5 presents a method for field comparison of anemometers.

J.2 Measurements of anemometer characteristics

J.2.1 Measurements in a wind tunnel for tilt angular response characteristics of cup anemometers

The tilt angular response is the measured wind speed at inclined flow angles relative to the measured wind speed at non-inclined flow. The tilt angular response of a cup anemometer shall be measured in a wind tunnel that fulfils the requirements described in Annex F. Additionally it shall be documented that the wind tunnel is sufficient in height for obtaining accurate tilt response characteristics.

The behaviour of an anemometer is strongly influenced by the free space around and especially underneath and above the anemometer. It is important that the tilting mechanism is designed in such a way that the centre of the sensing part of the anemometer is fixed but free to rotate, and the bottom plate of the wind tunnel shall be closed in order to prevent adverse flow effects. Therefore no translatory motion may be performed by the rotor, instead only an inclination of the rotor plane is realized.

The tilt angle response may be measured with two alternative methods, one using a sweep and the other using fixed positions.

The determination of the anemometer's response to quasi statically inclined flow should be performed with the help of an automatic tilt angle device installed in the wind tunnel. During the measurements, the anemometer is slowly tilted back and forth with a very slow sweep rate (less than 0,05°/s) so the influence on the results due to the angular speed can be neglected. Sweeps may only be used if the wind speed in the wind tunnel is kept within 0,5 % of the nominal wind speed for all tilt angles.

At non-inclined flow, the tilt angle shall be fixed and measurements shall be performed for 300 s to ensure that sufficient data is collected for the zero bin ($\pm 0,5^\circ$). This zero bin data is used for normalisation of the tilt angular response.

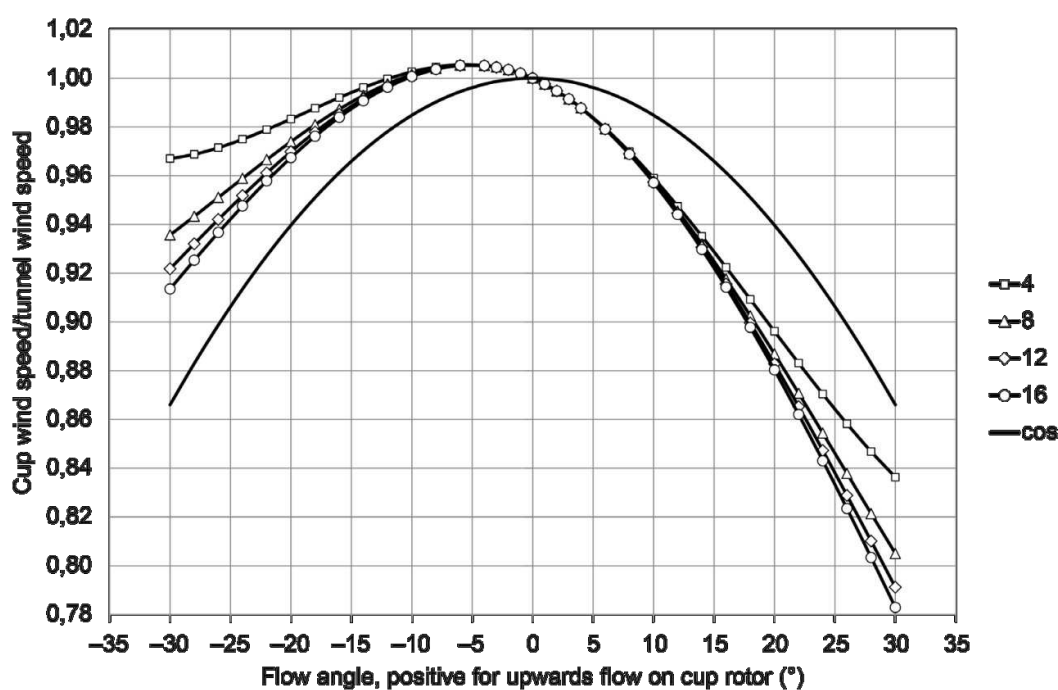
Recording of tilt angle, wind tunnel wind speed and anemometer output shall be made simultaneously and averaged. It can be meaningful to incorporate a finer resolution of the bin-averaging algorithm to account for higher gradients in the tilt angle response around zero degrees.

The tilt angular response should alternatively be determined by stepwise fixed position measurements, where the response at each angle is determined by Annex F wind tunnel calibration at selected nominal wind speeds in the wind speed range.

Measurement matrix recommendations:

- definition of flow angle: positive for upwards flow on cup rotor;
- tilt angle range and steps: at least -30° to $+30^\circ$ (for example $\pm 0^\circ$, $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$, $\pm 3^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$, $\pm 8^\circ$... $\pm 30^\circ$);
- wind speed range and steps: 4 m/s to 16 m/s (for example 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s and 16 m/s);
- bin averaging range for the sweep method: bin width max 2° .

An example of tilt angular response (including the “ideal” cosine shape) is shown in Figure J.1.



IEC

Figure J.1 – Tilt angular response $V_\alpha/V_{\alpha=0}$ of a cup anemometer as function of flow angle α compared to cosine response

J.2.2 Wind tunnel measurements of directional characteristics of cup anemometers

The design of certain cup anemometers (e.g. asymmetric housing shape, asymmetric cable entries, etc.) may have an adverse effect of the anemometer wind speed signal with respect to the horizontal flow direction and the reference direction used for calibration (yaw sensitivity). This effect is not desired since it usually cannot be corrected for. It may contribute

substantially to the total uncertainty in the wind speed measurement. Yaw sensitivity measurements shall be conducted at wind speeds of 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s, and 16 m/s.

J.2.3 Wind tunnel measurements of cup anemometer rotor torque characteristics

The dynamic response of a cup anemometer to wind is governed by Equation (J.1), where I is the mass moment of inertia, ω is the angular velocity, t is time, Q_A is the aerodynamic rotor torque and Q_F is the torque due to friction (mainly in bearings).

$$I \frac{d\omega}{dt} = Q_A - Q_F \quad (J.1)$$

The net torque, $Q_A - Q_F$, on the cup anemometer rotor, and thus the rotor torque characteristics, can be measured in a wind tunnel.

The aerodynamic torque can be measured by forcing the rotor to turn at off-equilibrium specific angular speeds while measuring the torque with a torque sensor.

The aerodynamic rotor torque on the cup anemometer is equal to the reaction torque on the shaft, measured with the torque sensor, minus friction torque. Measurements close to the equilibrium angular speed should be very accurate and detailed. An example of a torque measurement, where the wind tunnel speed was kept constant at 8 m/s and the rotational speed of the rotor was varied, is shown in Figure J.2.

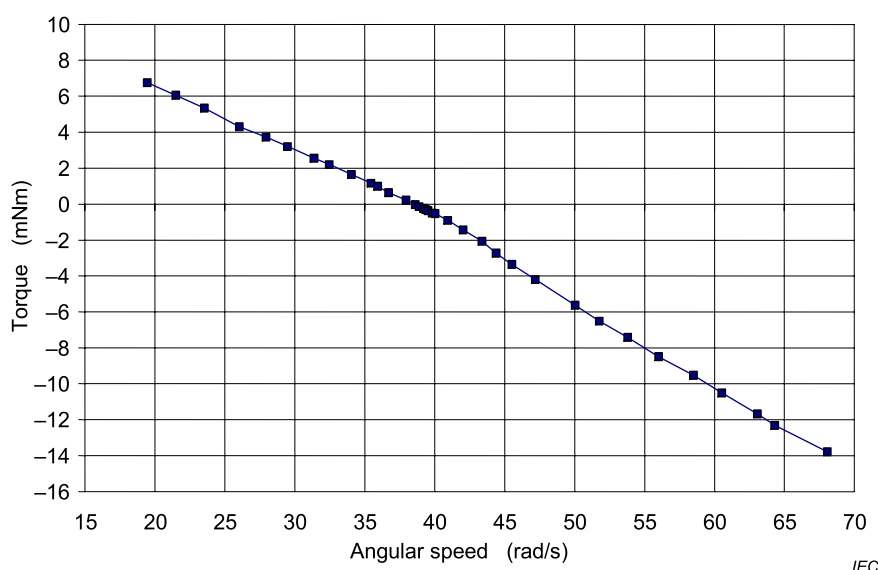


Figure J.2 – Wind tunnel torque measurements $Q_A - Q_F$ as function of angular speed ω of a cup anemometer rotor at 8 m/s

J.2.4 Wind tunnel measurements of step responses of cup anemometers

The rotor torque characteristics may alternatively be measured with a step response method in a wind tunnel. This method is less precise than the method in J.2.3 because linear torque characteristics on either side of the equilibrium speed ratio (torque coefficient equal to zero, see J.3.2) shall be assumed.

A step response is a method where a cup anemometer, in a wind tunnel of constant flow speed, is forced to an off-equilibrium rotational speed, above or below the equilibrium wind speed, where the recovery to equilibrium angular speed is monitored. The recovery region close to equilibrium is the important part of the recovery. It is recommended to use the data from the recovery region between 50 % and 98 % of the equilibrium rotor speed during the

acceleration tests, and between 150 % and 102 % during the deceleration tests when fitting the torque coefficient lines.

The method to force the anemometer to operate off-equilibrium can be made by attaching a thin shaft to the top of the cup anemometer rotor, and extending it through a hole in the tunnel wall to a motor. The rotational speed is controlled by the motor, which is mechanically disengaged from the rotor when the measurement of the acceleration or deceleration is to start.

Alternatively, the off-equilibrium state can be achieved by applying one or more jets of compressed air to the one or the other side of the cup anemometer rotor. However, care shall be taken not to disturb the upstream wind in the tunnel.

The off-equilibrium starting states should be well outside the rotational range for the analysis (50 % to 150 % of equilibrium rotor speed) to ensure the excitation device is not influencing the data used for fitting.

In case the torque characteristics can be expressed by a linear relationship on either side of torque equilibrium (torque equal to zero), then the step response can be expressed with the equation:

$$u(t) = u_t - \Delta u \cdot \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right) \quad (\text{J.2})$$

where

- $u(t)$ is the measured wind speed by the cup anemometer at time t using the ordinary calibration function;
- u_t is the tunnel wind speed;
- Δu is the difference between wind tunnel wind speed and the indicated wind speed of the cup anemometer, at the beginning of the step response measurement, at time t_0 ;
- t is the time;
- τ is the time constant to be determined for the step response (τ_{low} for step response from below and τ_{high} for step response from above).

In fitting the data to the two unknown constants τ and t_0 , it is useful to reformulate Equation (J.2) and to use linear regression to determine the time constant τ :

$$\ln\left(\frac{u_t - u(t)}{\Delta u}\right) = \frac{t - t_0}{\tau} \quad (\text{J.3})$$

An example of using the step response method results to determine the linear torque from the time constants is further described in J.3.2.

J.2.5 Measurement of temperature induced effects on anemometer performance

Temperature induced effects influencing the anemometer performance shall be assessed.

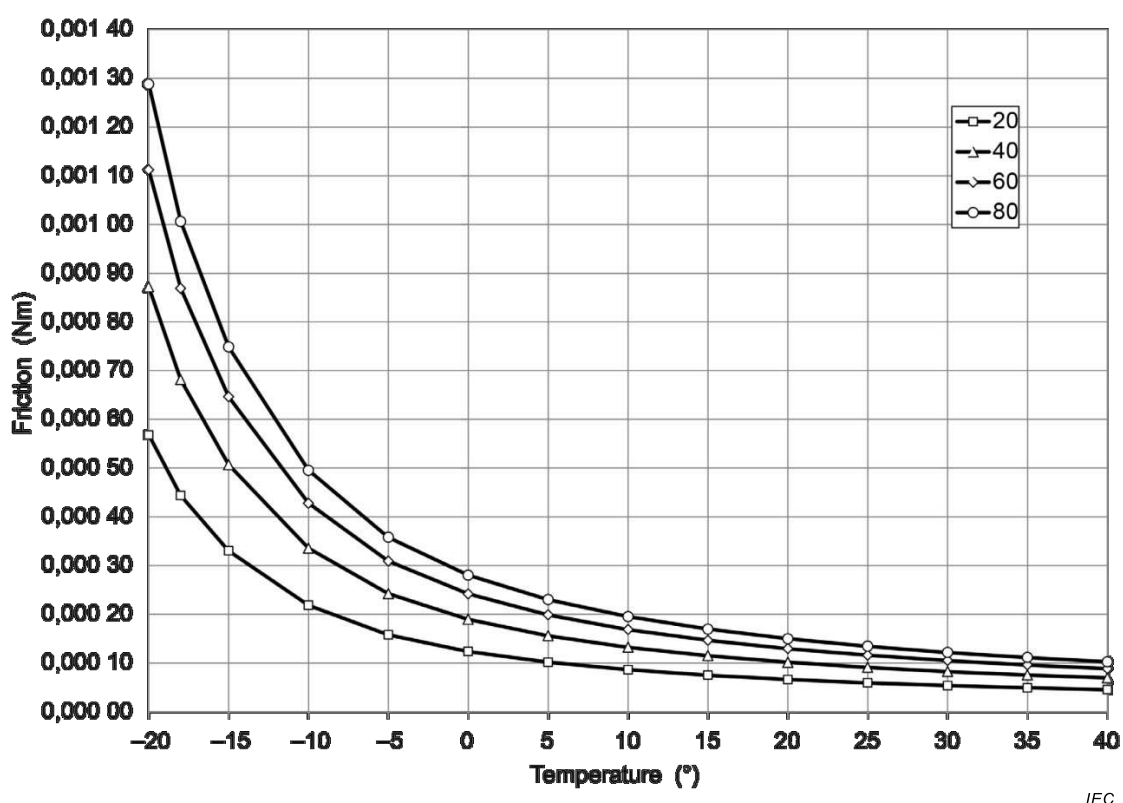
J.2.5.1 Measurement of friction torque in a cup anemometer

The temperature-dependant effects due to bearing friction shall be assessed by a flywheel test in a climate chamber [11].

Friction torque measurements shall be made by replacing the cup anemometer rotor with a flywheel, and by measuring the deceleration from a rotational speed corresponding to 20 m/s. There are two torques acting on the rotor, friction torque in the bearings³⁷ and air friction torque on the flywheel (which shall be subtracted from the measured torque). The tests shall be performed at temperatures from –20 °C to +40 °C at least with a 5 °C graduation. For each temperature the friction may be expressed with a second order polynomial with three constants F_0 , F_1 and F_2 .

$$Q_F = F_0 + F_1 \omega + F_2 \omega^2 \quad (\text{J.4})$$

Figure J.3 shows an example of friction torque in bearings as function of temperature for fixed rotational speeds.



IEC

Figure J.3 – Example of bearing friction torque Q_F as function of temperature for a range of angular speeds ω

J.2.5.2 Wind tunnel tests at different temperature and wind speeds

Influence of temperature effects on a whole anemometer (cup anemometers as well as sonic anemometers) may be verified with climate wind tunnel tests. The tests may be performed at temperatures according to Table I.1 from –20 °C to +40 °C at a 5 °C graduation. The tests may be conducted at 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s and 16 m/s. The wind speed deviations from the standard calibration of the anemometer may then be determined. Caution shall be exercised to ensure that the findings of the wind tunnel tests are not biased by undesired effects (e.g.

³⁷ There may be friction torque due to other causes than bearing friction, for example friction due to signal generation. Such torque shall be included in the friction torque measurements.

the accretion of rime upon the anemometer rotor). The results should be compared to simulated values calculated with the cup anemometer model in J.3.2.

J.2.6 Wind tunnel measurements of directional characteristics of sonic anemometers

The directional influence on the output of sonic anemometers shall be measured in a wind tunnel that fulfils the requirements described in Annex F.

The determination of the anemometer's response to quasi statically inclined/and or yawed air flow shall be performed with the help of an automatic tilt and yaw angle device installed in the wind tunnel. During the measurements, the anemometer is positioned in a fixed tilt angle. The yaw direction may be specified for fixed yaw positions with measurements for 30 s averages, or it may be yawed continuously with a sweep rate of about $1^\circ/\text{s}$ ³⁸. The yawing shall be performed for the pre-defined measurement sector of the sonic. The tilt angle of the sonic shall be fixed for the following tilt angles: 0° , $\pm 2^\circ$, $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$. Tilt angles should be added or omitted if there is clear evidence that they are needed or unneeded. The measurements shall be performed for the wind speeds: 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s, and 16 m/s. For each direction, the deviation of the indicated wind speed of the sonic anemometer from the ordinary calibration at the reference direction shall be derived.

J.3 A cup anemometer classification method based on wind tunnel and laboratory tests and cup anemometer modelling

J.3.1 Method

The classification method shall use an appropriate cup anemometer model to determine deviations due to influence parameters according to Table I.1. The cup anemometer model shall be verified to be able to include all the influential parameters properly. The method shall be based on the wind tunnel and laboratory measurements described in Clause J.2. Furthermore, the method shall use an artificial wind generator in order to generate three-dimensional time domain input wind data for the cup anemometer model. The deviations ε_i shall be determined from the differences between the 10 min horizontal wind speed input averages from the artificial wind generator and the 10 min cup anemometer model response averages.

J.3.2 Example of a cup anemometer model

J.3.2.1 General

The example cup anemometer model is a physical model that simulates cup anemometer response in time domain, see references [7] and [8]. Some physical properties of the cup anemometer shall be measured and used throughout the assessment. These are: rotor inertia I , frontal area of one cup A and radius R from shaft centre to the centre of the cups.

The response of the cup anemometer to the three-dimensional wind shall be derived from a torque equilibrium differential equation, where the torque on the rotor consists of aerodynamic torque minus friction torque (right hand side of equation), see Equation (J.1).

From the differential equation the angular speed of the cup anemometer ω is found, and using the wind tunnel calibration values, the response from the resulting aerodynamic torque and friction torques due to wind variations is determined. The aerodynamic torque Q_A is a function of the instantaneous wind vector $\vec{U} = \{u, v, w\}$ as determined by the artificial wind

³⁸ The use of fixed yaw directions improves measurement accuracy while the use of a slow sweep rate method is an advantage to reveal the detailed changes that may occur.

generator. From the wind vector the upflow angle and the scalar of the wind vector is determined:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) \quad (\text{J.5})$$

$$|\vec{U}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (\text{J.6})$$

An equivalent horizontal wind speed is found by multiplying the scalar of the wind vector with the angular response measured in wind tunnel for the instantaneous upflow angle:

$$U_{\text{eq}} = F_{\alpha}\left(\alpha, |\vec{U}|\right) \cdot |\vec{U}| \quad (\text{J.7})$$

Here $F_{\alpha}\left(\alpha, |\vec{U}|\right)$ is the tilt angular response of the cup anemometer as shown in Figure J.1.

The aerodynamic torque can be expressed by a generalized torque curve which has been verified to be valid for all wind speeds and all rotational speeds [11]:

$$Q_A = \frac{1}{2} \rho A R U_{\text{eq}}^2 C_{QA}(\lambda) \quad (\text{J.8})$$

where

ρ is the air density;

A is the cup area of one cup;

R is the radius to a cup;

U_{eq} is the equivalent horizontal wind speed;

C_{QA} is the generalized aerodynamic rotor torque coefficient.

The generalized aerodynamic rotor torque coefficient is derived from the wind tunnel torque measurements in J.2.3 or J.2.4 where U_{eq} in this case is substituted by the tunnel wind speed:

$$C_{QA} = C_{QA}(\lambda) = \frac{Q_Q}{\frac{1}{2} \rho A R U_{\text{eq}}^2} \quad (\text{J.9})$$

The generalized aerodynamic rotor torque coefficient is a function of the speed ratio:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{\text{eq}} - U_t} \quad (\text{J.10})$$

where

U_t is a threshold wind speed (derived as the remaining of the calibration offset when the friction influence has been subtracted; if friction is zero, the threshold wind speed is equal to the calibration offset).

In case the rotor torque coefficient can be characterized by two linear curves on either side of the torque equilibrium then two corresponding time constants can be determined by wind tunnel step response measurements, see J.2.4 and [9]. The linear torque characteristics can

then be determined from the τ values, for low and high speed ratios respectively, from the equation:

$$K = -\frac{2I(u_0 + \Delta u - U_t)}{\rho A R^2 (u_0 + \Delta u)^2 \tau} \quad (\text{J.11})$$

The generalized aerodynamic rotor torque coefficient can then be expressed by:

$$\text{for } \lambda \leq \lambda_0 : C_{QA} = K_{\text{low}} (\lambda - \lambda_0) \text{ and for } \lambda > \lambda_0 : C_{QA} = K_{\text{high}} (\lambda - \lambda_0) \quad (\text{J.12})$$

where

λ_0 is the speed ratio for $C_{QA} = 0$.

An example of the rotor torque coefficient is shown in Figure J.4.

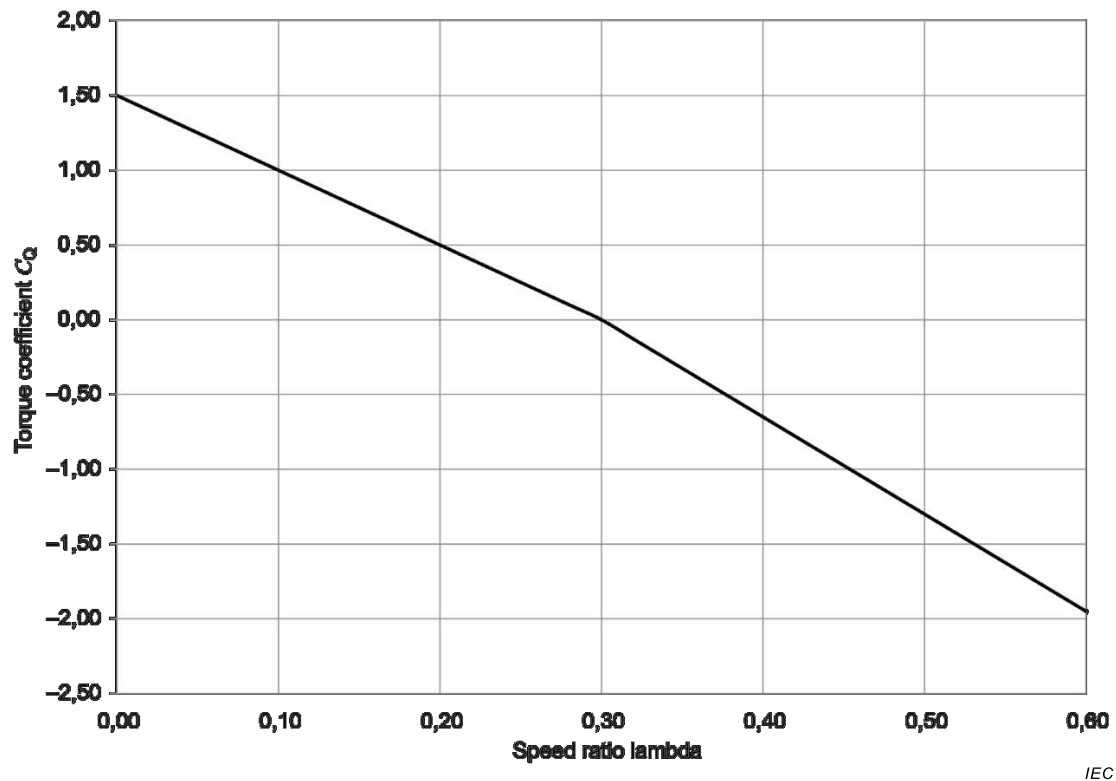


Figure J.4 – Example of rotor torque coefficient C_{QA} as function of speed ratio λ derived from step responses with K_{low} equal to $-5,5$ and K_{high} equal to $-6,5$

The friction torque is a function of the temperature and the rotational speed as found from the friction measurements in J.2.5.1:

$$Q_F = Q_F(T, \omega) \quad (\text{J.13})$$

J.3.2.2 Influence parameter range variations and example class determination

The influence parameter ranges shall be varied by using a turbulence model that generates artificial three-dimensional 10 min time series wind speeds with a sample speed of at least 10 Hz. Exposing the cup anemometer model for such artificial winds, the responses of the cup

anemometer are derived and the deviations from the horizontal wind speed of the artificial winds are found. The deviations for all combinations of the influence parameter ranges may be derived by a Monte Carlo process. The deviations determine the class as expressed in Equation (I.1). An example of classification of a cup anemometer is shown in Figure J.5 and with the characteristics shown in Figure J.3 and Figure J.4 and with the data presented in Table J.1 and Table J.2. Other data related to the classification are shown in Table J.3.

Deviations for Classes A, B, C and D of all influence parameters are shown in Figure J.5 and Figure J.6. The resulting classes are 1,69A, 6,56B, 8,01C and 9,94D. The cup anemometer with class 1,69A thus meets the requirements of 1,70A for use in terrain that meets the requirements in Annex B and in type A terrain in C.3.1 for temperatures above 0 °C, but not for temperatures below 0 °C with class 8,01C. The cup anemometer do not meet the recommended requirements of a class 2.5B or 2.5D for terrain that do not meet the requirements in Annex B.

Table J.1 – Tilt angle response of example cup anemometer

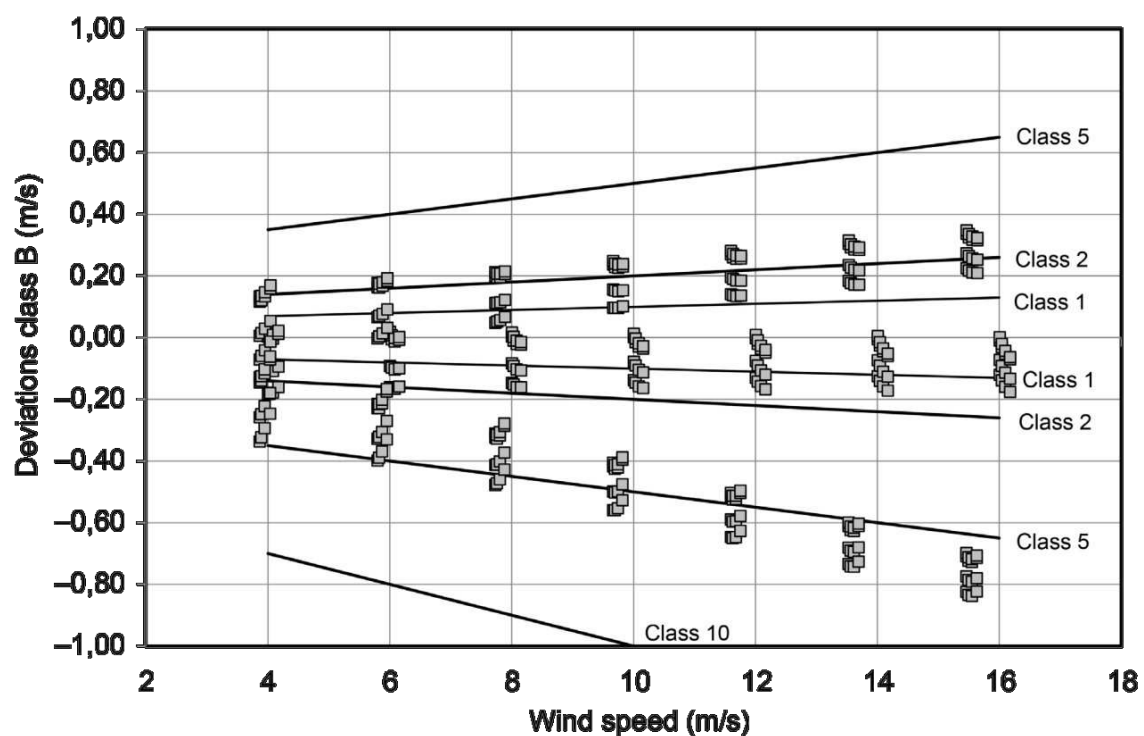
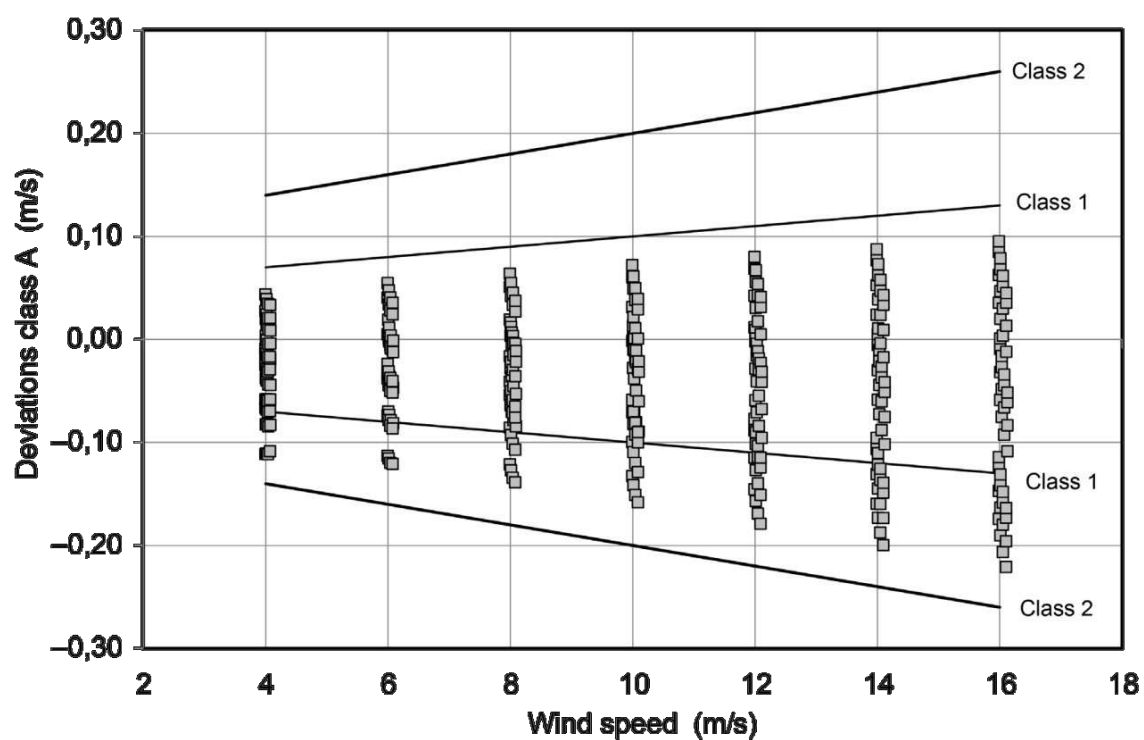
Wsp V (m/s)	4	8	12	16
Angle α (°)	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$
–30	0,967 005	0,935 689	0,921 815	0,913 545
–28	0,968 769	0,943 307	0,932 028	0,925 304
–26	0,971 484	0,951 098	0,942 067	0,936 683
–24	0,974 941	0,958 908	0,951 805	0,947 569
–22	0,978 933	0,966 583	0,961 111	0,957 850
–20	0,983 253	0,973 974	0,969 863	0,967 413
–18	0,987 695	0,980 930	0,977 934	0,976 148
–16	0,992 055	0,987 304	0,985 199	0,983 945
–14	0,996 131	0,992 948	0,991 538	0,990 698
–12	0,999 722	0,997 717	0,996 829	0,996 301
–10	1,002 628	1,001 468	1,000 954	1,000 648
–8	1,004 651	1,004 057	1,003 793	1,003 637
–6	1,005 594	1,005 344	1,005 233	1,005 166
–4	1,005 262	1,005 188	1,005 155	1,005 136
–3	1,004 558	1,004 526	1,004 513	1,004 505
–2	1,003 462	1,003 452	1,003 448	1,003 446
–1	1,001 951	1,001 950	1,001 949	1,001 949
0	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000
1	0,997 595	0,997 594	0,997 593	0,997 593
2	0,994 750	0,994 740	0,994 736	0,994 734
3	0,991 490	0,991 458	0,991 445	0,991 437
4	0,987 838	0,987 764	0,987 731	0,987 712
6	0,979 458	0,979 208	0,979 097	0,979 030
8	0,969 803	0,969 209	0,968 945	0,968 789
10	0,959 068	0,957 908	0,957 394	0,957 088
12	0,947 450	0,945 445	0,944 557	0,944 029
14	0,935 147	0,931 964	0,930 554	0,929 714
16	0,922 359	0,917 608	0,915 503	0,914 249
18	0,909 287	0,902 522	0,899 526	0,897 740
20	0,896 133	0,886 854	0,882 743	0,880 293
22	0,883 101	0,870 751	0,865 279	0,862 018
24	0,870 397	0,854 364	0,847 261	0,843 025
26	0,858 228	0,837 842	0,828 811	0,823 427
28	0,846 801	0,821 339	0,810 060	0,803 336
30	0,836 325	0,805 009	0,791 135	0,782 865

Table J.2 – Friction coefficients of example cup anemometer

Temp	F0	F1	F2
(°C)	(Nm)	(Nms)	(Nms ²)
–20	2,000E-04	2,000E-05	–8,000E-08
–18	1,563E-04	1,563E-05	–5,714E-08
–15	1,163E-04	1,163E-05	–4,000E-08
–10	7,692E-05	7,692E-06	–3,077E-08
–5	5,556E-05	5,556E-06	–2,222E-08
0	4,348E-05	4,348E-06	–1,739E-08
5	3,571E-05	3,571E-06	–1,429E-08
10	3,030E-05	3,030E-06	–1,212E-08
15	2,632E-05	2,632E-06	–1,053E-08
20	2,326E-05	2,326E-06	–9,302E-09
25	2,083E-05	2,083E-06	–8,333E-09
30	1,887E-05	1,887E-06	–7,547E-09
35	1,724E-05	1,724E-06	–6,897E-09
40	1,587E-05	1,587E-06	–6,349E-09

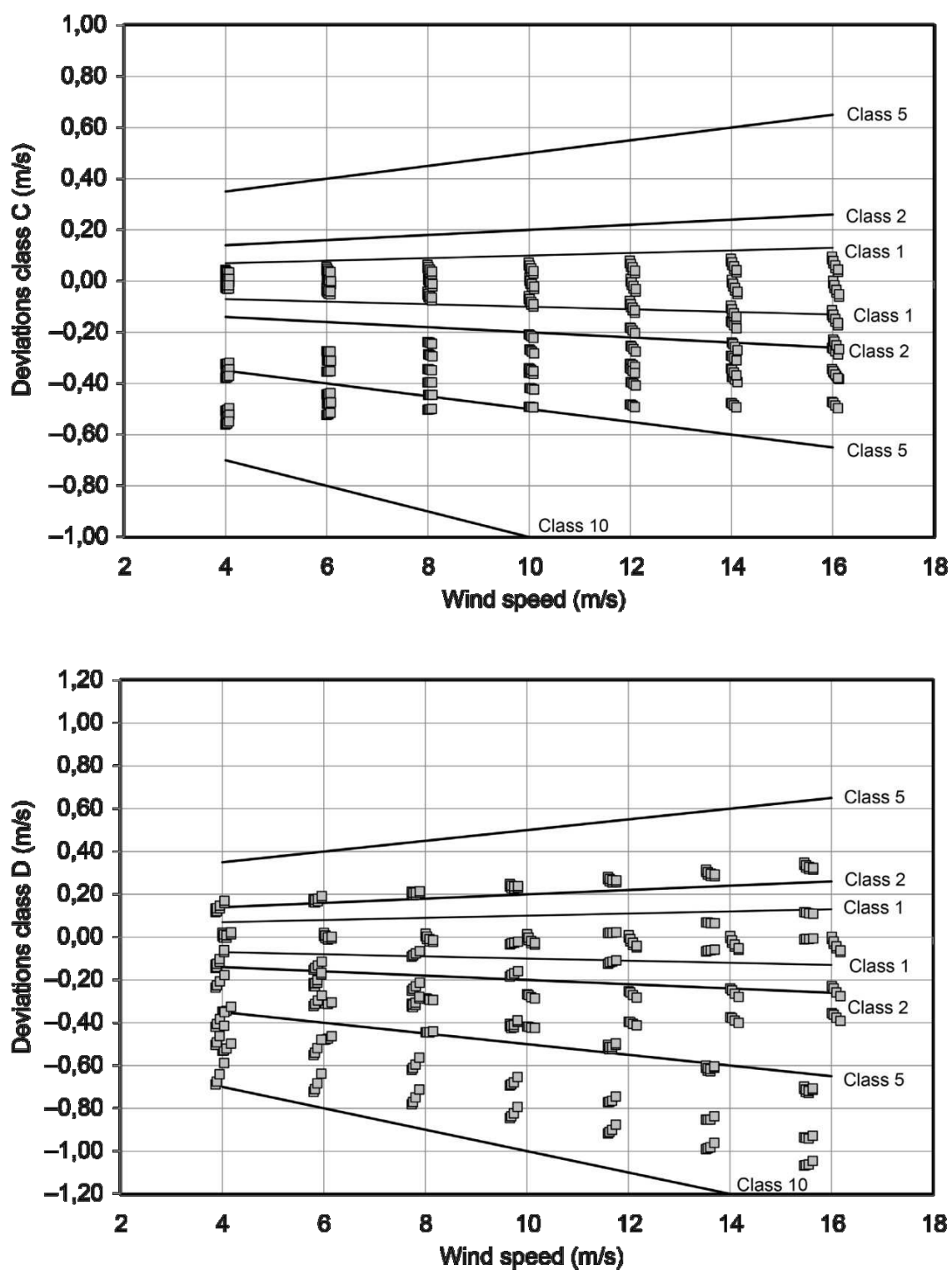
Table J.3 – Miscellaneous data related to classification of example cup anemometer

Cup diameter	75 mm
Cup area A	0,004 417 87 m ²
Radius to cup centre R	65 mm
Rotor inertia I	0,000 2 kgm ²
Equilibrium speed ratio λ_0	0,3
Calibration temperature	20 °C
Calibration barometric pressure	1 013 hPa
Calibration air density ρ	1,203 821 kg/m ³
Calibration turbulence intensity	0,003
Calibration turbulence structure	Isotropic $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w = 1/1/1$
Calibration coefficients A and B	0,679 55 and 0,258 70
Calibration friction coefficients F_0 , F_1 and F_2 at 20 °C	see Table J.3 for 20 °C
Torque coefficient slopes K_{low} and K_{high}	–5,0 and –6,5



IEC

Figure J.5 – Classification deviations of example cup anemometer showing a class 1,69A (upper) and a class 6,56B (lower)



IEC

Figure J.6 – Classification deviations of example cup anemometer showing a class 8,01C (upper) and a class 9,94D (lower)

J.4 A sonic anemometer classification method based on wind tunnel tests and sonic anemometer modelling

The classification method uses a sonic anemometer model to determine deviations due to influence parameters. The method is based on wind tunnel and laboratory measurements as described in J.2.6 and J.2.5.2. Furthermore, the sonic anemometer classification method uses

an artificial wind generator similar to the one for the cup anemometer model, see J.3.2, in order to generate three-dimensional time domain input wind data for the sonic anemometer model.

The response of the sonic anemometer is a function of the instantaneous wind vector $\vec{U} = \{u, v, w\}$ as determined by the artificial wind generator. From the wind vector the upflow angle and the scalar of the wind vector is determined by Equations (J.5) and (J.6). The response is then determined by interpolation in the measured data from the wind tunnel measurements:

$$U_{\text{sonic}} = F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|) \cdot |\vec{U}| \quad (\text{J.14})$$

where

$F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|)$ is the tilt and yaw response function for the sonic anemometer.

Deviations are determined from differences between sonic anemometer model responses and artificial wind data averages, see J.3.2.2. The relevant influence parameters are tilt and yaw angular responses and temperature induced effects.

J.5 Free field comparison measurements

In a free field comparison measurement, two anemometers can be compared. The comparison measurement can be used to verify that the methods being used in classification of the instruments are consistent, see J.3 and J.4. The comparison of anemometers requires that both anemometers are calibrated in the same wind tunnel. The setup in the field should be made according the mounting procedures for two top-mounted anemometers as described in Annex G, using the maximum distance between them. A 3D ultrasonic anemometer (U, V, and W calibrated) shall be mounted on a boom below the two sensors to measure the environmental influence parameter ranges (flow angle, turbulence, turbulence spectrum), for a class S measurement campaign classification analysis. Additionally, air temperature shall be measured on the same boom for determination of the temperature range, and air pressure shall be measured for determination of the air density range. Time traces of the 3D sonic shall be recorded, while 10 min average measurements in a relatively small sector perpendicular to the boom are acceptable for the two anemometers under comparison. An acceptable database (at least 180 h) shall be collected for a wind speed range of 4 m/s to 16 m/s and a range of turbulence intensities (for instance from 0,04 to 0,14). Comparison of two anemometers should then be made by deriving a class S classification of the two anemometers from laboratory tests, and comparing these with the field measurements.

Annex K (normative)

In-situ comparison of anemometers

K.1 General

It shall be proven that an anemometer used for power performance measurements does not change its calibration during the measurement period. The anemometer can be calibrated in a wind tunnel after the measurement period to show the differences to the calibration before the measurement period. Another method is the in-situ comparison made by comparing the primary anemometer to a control anemometer installed in close proximity during the measurement period. It should be noted that this method does not identify a gradual degradation of the calibration of the anemometer if the control anemometer degrades at a similar rate. The in-situ comparison should be repeated on a regular basis to identify problems at an early stage.

K.2 Prerequisite

During the measurement period the two anemometers are installed on the meteorological mast according to Annex G. The primary anemometer is used for the power performance measurements. The other is the control anemometer, and is used for the in-situ comparison. The anemometers can be installed in three variants:

- a) variant 1: top mounted according to Clause G.2;
- b) variant 2: alternative top mounted according to Clause G.3;
- c) variant 3: both anemometers side-mounted according to Clause G.4.

K.3 Analysis method

Two databases will be compared using the 10 min average values recorded during the power performance measurement period. The first database includes data that starts directly after the installation of the anemometers. The second database includes data for the last part of the power performance measurement period. Each database shall meet the following requirements:

- a) cover a range from 4 m/s to 12 m/s;
- b) wind directions shall be in the valid measurement sector;
- c) each wind speed bin shall have a minimum of 3 points of data. There are two possible choices of binning the data as follows:
 - 1) Binning option 1: Wind speed bins of 1 m/s width, centred on 1,0 m/s values, based on the control anemometer wind speed from one wind direction bin not larger than $\pm 15^\circ$.
 - 2) Binning option 2: Wind speed bins of 4 m/s width centred on 2 m/s, 6 m/s, 10 m/s and 14 m/s³⁹ based on the control anemometer wind speed and wind direction bins of 10° .
- d) include a wind direction sector with the meteorological mast free of wakes of any wind turbines and with the anemometers free of wakes of the meteorological mast as follows:
 - 1) In the case of side-by-side anemometer mounting (variant 2) and using only wind speed binning for one wind direction sector (binning option 1), the wind direction sector should include the wind direction that is 90° to the boom direction and in acceptable wind directions;

³⁹ Note that this wind speed range of 0 m/s to 16 m/s is for this interim analysis step only and that the final analysis is to be based on the 4 m/s to 12 m/s range.

- 2) In the case of a top-mounted anemometer (variant 1), the wind direction bin(s) shall be out of the wake of the meteorological mast. Therefore the horizontal connection lines (see Figure K.1 and Figure K.2) between the centre of the control anemometer and any part of the meteorological mast shall have a minimum angular distance of 45° to the border of the bin(s).

e) maximum duration shall be 8 weeks.

The wind direction bin(s) used for the analysis shall be clearly stated in the report.

If 1 m/s wind speed bins and one wind direction bin of 30° (binning option 1) are applied, a linear regression is performed with the primary anemometer as the dependent variable and the control anemometer as the independent variable. This regression will be used to calculate the estimated primary anemometer wind speed, termed $V_{\text{primary\_est}}$.

$$V_{\text{primary\_est}} = m \cdot V_{\text{control}} + b \quad (\text{K.1})$$

where

m is the slope of the regression relating V_{control} to $V_{\text{primary\_est}}$;

b is the offset of the regression relating V_{control} to $V_{\text{primary\_est}}$;

V_{control} is the wind speed of the control anemometer.

The intention is to show a change over time in the behaviour of an anemometer, not an absolute calibration.

If 4 m/s width wind speed bins and 10° wind direction bins (binning option 2) are applied, a piecewise linear interpolation between wind speed bins in each wind direction bin from the first database can be used to estimate the primary anemometer wind speed based on:

$$V_{\text{primary\_est}} = \frac{V_{\text{primary},i} - V_{\text{primary},i-1}}{V_{\text{control},i} - V_{\text{control},i-1}} (V_{\text{control}} - V_{\text{control},i-1}) + V_{\text{primary},i-1} \quad (\text{K.2})$$

In this case, only data of the control anemometer within the wind speed bins covered by the first database in each wind direction bin shall be used for the evaluation of the in-situ comparison in the second database. Equation (K.2) may be used for extrapolation up to the borders of the covered wind speed bins. If there is only one wind speed bin covered in a wind direction bin, the ratio of the bin averages of the wind speeds measured by the primary anemometer and the control anemometer shall be used as correction factor for the measurement of the control anemometer.

K.4 Evaluation criteria

Apply the regression or the piecewise linear interpolations from the first database to the control anemometer measurements of the second database resulting in an estimated primary anemometer wind speed for each 10 min period.

Calculate the average of differences (systematic deviation) in the measured and estimated primary anemometer wind speed for 1 m/s wide wind speed bins centred around 1 m/s values. The systematic deviation is:

$$\gamma = \frac{\sum (V_{\text{primary\_est}} - V_{\text{primary}})}{n} \quad (\text{K.3})$$

Calculate the standard uncertainty of wind speed differences (statistical deviation) of the estimated primary anemometer and the measured primary anemometer wind speeds for each wind speed bin. The standard uncertainty of the wind speed differences is the standard deviation of wind speed differences divided by the square root of the number of measured data points. The standard uncertainty is:

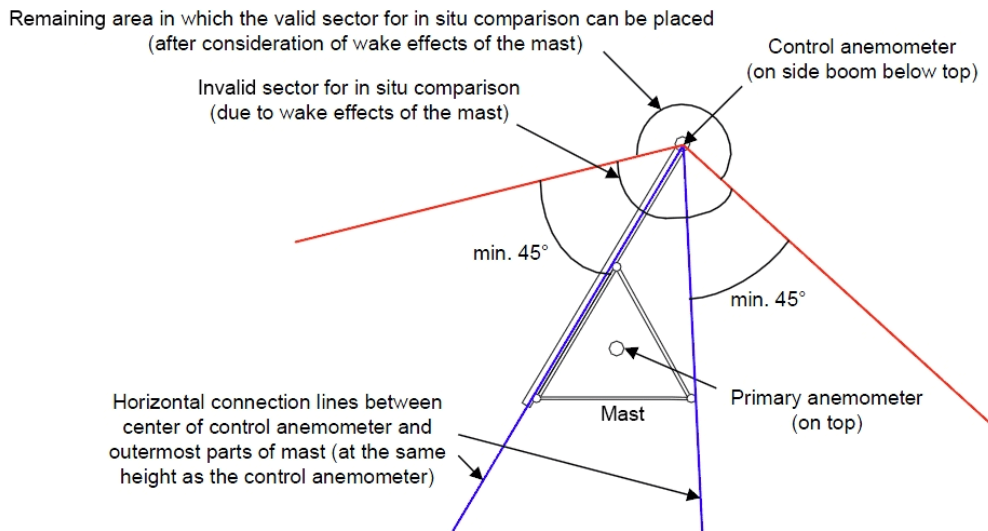
$$\sigma = \frac{\text{stdev}(y)}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_{\text{primary\_est}} - V_{\text{primary}})^2}{n}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{K.4})$$

If the root-sum-square of the average of differences (systemic deviation) and the standard uncertainty of wind speed differences (statistical deviation) does not exceed 0,1 m/s in any bin between 4 m/s and 12 m/s, the in-situ test has passed.

$$\delta = \sqrt{\gamma^2 + \sigma^2} < 0,1 \text{ m/s} \quad (\text{K.5})$$

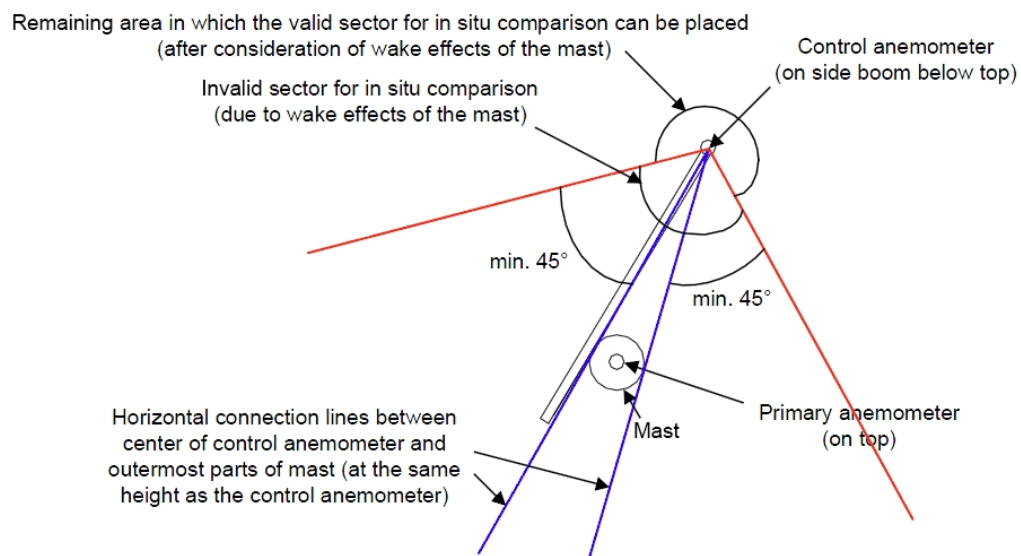
If the value δ is above 0,1 m/s in at least one bin and does not exceed 0,2 m/s in all bins between 4 m/s and 12 m/s, the uncertainty of the anemometer calibration $u_{V_{I,I}}$ shall be increased at least to the maximum value of δ in the wind speed range 4 m/s to 12 m/s. If the value δ is larger than 0,2 m/s in any bin between 4 m/s and 12 m/s, the in-situ test should be shifted to an earlier period until δ does not exceed 0,2 m/s anymore. The power curve data after this period shall be rejected, and the uncertainty of the anemometer calibration $u_{V_{I,I}}$ of the remaining power curve data shall be treated as in the case of no data rejection.

NOTE The in-situ test can be repeated often during the measurement campaign to aid in the identification of intermittent anemometer degradation.



IEC

Figure K.1 – Example with triangular lattice meteorological mast



IEC

Figure K.2 – Example with tubular meteorological mast

Annex L (normative)

The application of remote sensing technology

L.1 General

Annex L describes the requirements for the operation of remote wind speed sensing devices such as light detection and ranging (LIDARS) and sound detection and ranging (SODARS) when deployed in relation to wind turbine power curve testing. A procedure is laid out that ensures the traceability of the measurements to international standards and presents associated uncertainty components for use in the power curve evaluation.

In the present version, the procedures pertain according to the following restrictions:

- a) A meteorological mast reaching at least the minimum of 40 m or the lower tip height of the wind turbine being tested shall be used during the power curve test to monitor the performance of the remote sensing device (e.g. a lower rotor tip height of 30 m requires that a monitoring height of at least 30 m is used, while a lower rotor tip height of 50 m requires a monitoring meteorological mast at least 40 m high).
- b) Only ground based remote sensing devices are used (e.g. nacelle mountings are not included).
- c) The use of remote sensing for conducting power performance assessments is limited to flat terrain, that is, situations where site calibration is not required in accordance with Annex B.

When compared to measurements from a meteorological mast-mounted cup anemometer, remote sensing device measurements typically display some degree of scatter. Some of this scatter arises due to the sensitivity of the remote sensing device to various environmental conditions (e.g. temperature and wind shear). It is the task of the classification test (Clause L.2) to identify and quantify these sensitivities for a number of discrete heights covering the measuring range of interest. As for cup anemometers it is assumed that these sensitivities will be type specific and the classification test needs to be performed for each type of remote sensing device for a minimum of two instruments of each type and at a minimum of two locations.

The remaining scatter in the cup anemometer comparison is considered to be random noise. This arises from a variety of sources. For example, the turbulent de-correlation in the wind due to the distance between the meteorological masts leads to scatter. Also, the distance between the individual probe volumes of the remote sensor itself could contribute to such scatter. The random noise is assumed to be unit and site specific, i.e. it can vary between different evaluations of the same remote sensing device.

Before being used in a power curve test, a particular unit of a remote sensing device shall first undergo a verification test (Clause L.3). As an alternative, the verification test can also be performed during the power curve test. This test is a comparison of the remote sensing device measurements to those from calibrated cup anemometers mounted on a meteorological mast spanning a significant portion of the height range of interest. The purpose of this test is to convey traceability to international standards to this particular device, in the form of an uncertainty. Usually the power curve test will take place at a different location and at a different time and therefore with a different distribution of environmental conditions than for the verification test. Depending on the sensitivities identified during the classification test, the different environmental conditions will alter the performance of the remote sensing device, increasing the uncertainty in relation to that determined in the verification test. Expressions for the uncertainty of the remote sensing device and how these should be used in the evaluation of the power curve uncertainty are given in Clause L.4.

Clause L.5 describes how the cup anemometer measurements from the short meteorological mast can be used to monitor the performance of the remote sensing device. By ensuring at least one common measuring height, it is possible to assess whether the uncertainty obtained in the classification and the verification test is consistent with the performance of the remote sensing device during the power curve test. If inconsistencies are identified from this monitoring, the corresponding uncertainties used in the power curve test are increased. This provides a useful 'safety net' for the methodology and a feedback mechanism that should promote realistic uncertainty assessments.

Specific details of how to use the remote sensing device in the power curve test are given in Clause L.6. Of particular relevance are the position and dimensions of the remote sensing device's probe volumes in relation to the wind turbine being tested.

Reporting requirements for the complete methodology are given in Clause L.7.

L.2 Classification of remote sensing devices

L.2.1 General

The accuracy of the RSD may be influenced by meteorological variables. As the meteorological conditions during the power curve test may be different from those prevailing during the RSD performance verification test, such influences are linked to additional uncertainty. It is therefore necessary to investigate the sensitivity of the performance of the remote sensing device to meteorological variables. The results of such tests shall identify the variables that influence the performance of the remote sensing device and determine the classification of the instrument.

The simplest of these evaluations entails considering the difference between the remote sensing device measurement and a reference measurement as function of one meteorological variable at a time. An accuracy class of the remote sensing device shall be evaluated for certain ranges of various environmental variables similar to the classification of cup anemometers according to Annex I, based on the empirical analysis of the sensitivities observed during classification tests. Care should be taken to allow for the possible interdependency of environmental variables (e.g. wind shear and turbulence intensity) so that sensitivities are not inadvertently double counted. The uncertainties arising due to remote sensing device classification can then be evaluated.

A case-specific accuracy class may also be evaluated based on the sensitivities of the remote sensing system and the variation of the environmental variables observed during the performance verification and power curve tests. It should be clearly stated whether a classification result has been derived generically on multiple units or whether it is based on a case-specific evaluation.

L.2.2 Data acquisition

The classification test is based on concurrent measurements obtained by the remote sensing device and a high reference meteorological mast with which it is compared. The measurements will be co-located, such that they characterise flow within the same volume of air. The degrees of concurrency and co-location that shall apply to the measurements are those that enable the determination of the most precise and well understood relationship between them. In particular:

- a) The same averaging intervals shall be used for the remote sensing device and reference sensor being compared: 10 min averages shall be recorded. In addition to 10 min averages, the standard deviations and extreme values of the measured variables within the 10 min periods shall be recorded.
- b) The number of samples acquired by each instrument during each averaging interval to obtain an average shall be recorded.

- c) It shall be noted whether the individual samples acquired within the averaging interval by the remote sensing device are cumulative values, representing, for example, a spectrum integrated from the beginning of the averaging interval to the moment at which the sample is acquired. This will have a bearing on statistics that require successive samples to be independent, such as standard deviation used in, for example, turbulence assessments.
- d) The device is sited and analysis of the measurements conducted in a manner that minimises extraneous influences on the relationship between the remote sensing device and reference sensor measurements. These influences may include, but are not limited to: flow perturbations; fixed echoes; real variations in the flow between the remote sensing device measurement volume and the reference instrument measurement location. The distance between the meteorological mast and the remote sensing device shall be a compromise allowing good correlation between meteorological mast and remote sensing device measurements while at the same time preventing or limiting the influence of the meteorological mast on the remote sensing device.
- e) The meteorological mast-mounted reference sensors shall comply to the requirements of this standard. This applies especially to the calibration, classification and mounting.
- f) The reference meteorological mast should preferably have a constant cross section and solidity across its height. In this way the influence of the meteorological mast on boom-mounted anemometers remains constant with height and allows a more accurate comparison of the measured wind shear between the meteorological mast and the remote sensing device.

The remote sensing device and reference sensors will be synchronised to within 1 % of the averaging interval, and this degree of synchronisation will be verified and tested for drift at least once a week. If comparison of time stamps indicates drift has occurred, the remote sensing device system clock will be reset to synchronise with the reference sensor system clock and remote sensing data time stamps adjusted to compensate for the drift over the period during which it is evident by linear interpolation. Data will be acquired until the following data coverage requirements are fulfilled:

- a) Reference sensor wind speed measurements will be binned into 0,5 m/s bins centred on integer multiples of 0,5 m/s.
- b) The data will be filtered according to the recommendations of the device manufacturer and the requirements of L.2.3. The following requirements shall be fulfilled after filtering.
- c) The data acquisition requirements of a classification test shall not be considered fulfilled unless at least 3 pairs of valid concurrent, co-located and filtered measurements have been recorded in each wind speed bin centred between 4 m/s and 16 m/s inclusive.
- d) The amount of acquired data shall cover a minimum of 180 h.
- e) The duration of the data acquisition campaign will last at least 3 months and cover a significant span of environmental conditions (e.g. winter to summer). The database shall cover at least 25 % of the bins as described in Table L.3 with a minimum number of data points as defined in Equation (L.2) for all variables which are known to influence the accuracy of the RSD.

A remote sensing device classification and verification shall be considered valid for the purposes of a power curve test of a wind turbine if the reference cup anemometers used during the classification and verification tests were mounted at a minimum of 3 heights, including the lower tip height of the wind turbine $\pm 25\%$ and the hub height of the wind turbine $\pm 25\%$. These height requirements for the classification and verification apply if the device is used for wind measurements over the entire height range of the wind turbine rotor or only for wind measurements up to hub height.

L.2.3 Data preparation

The following data filters shall be applied:

- a) The reference meteorological mast shall be free of wakes from wind turbines and obstacles as defined in Annex A.

- b) Probe volumes within which the remote sensing device acquires a radial velocity measurement shall be free of wakes and flow perturbation from wind turbines and obstacles as defined in Annex A. The influence of the wake of the reference meteorological mast on the measurements of the remote sensing device shall be inspected by plotting the ratio of the remote sensing device and reference sensor measurements as a function of wind direction. Criteria regarding the permissible values of this ratio may be developed with reference to the corresponding considerations for cup anemometry discussed in Clause G.4. Remote sensing device measurements shall be excluded if they are influenced by either the meteorological mast or its guy wires.
- c) Reference cup anemometers shall be free from the influence of the wakes of the meteorological mast, its guy wires or lightning receptor as defined in this standard.
- d) The reference cup anemometers shall not be influenced by icing. This may be achieved by any means deemed to be suitable subject to the requirement that the method and results are adequately documented.
- e) The measurements that are recorded for each averaging interval by both the remote sensing device and reference sensors will represent a single contiguous period of operation whose duration equals the averaging interval. However, as discussed below in L.2.4, there is a possibility that the data availability requirements may be relaxed. The influence that relaxing these requirements could have on the measurement accuracy should be checked by means of a sensitivity analysis. If the remote sensing device does not record the proportion of the period in the 10 min averaging interval during which it has been available, a general quality factor shall be recorded to indicate the reliability of the measurement in a similar manner as device availability. Data may then be filtered or a sensitivity analysis may be performed with reference to the quality factor. Guidance shall be provided by the manufacturer regarding the appropriate treatment of the quality factor;
- f) In general no filtering on precipitation should be undertaken. Precipitation should be treated as an environmental variable in the classification test. If a remote sensing device manufacturer's guidelines make provision for filtering with reference to precipitation, these guidelines should be followed. If filtering is undertaken with reference to precipitation, the filtered data should be considered a special dataset and classification, verification and application of the remote sensing device be conducted in a manner consistent with this.

Measurements of boom-mounted reference sensors may be corrected for meteorological mast effects (blockage effects and flow acceleration effects). It should be noted that such correction of meteorological mast effects incurs additional uncertainty in comparison with top mounted reference sensors. The correction may be achieved by any means deemed suitable for reducing the total uncertainty, subject to the requirement that the method and results are adequately documented. Uncertainty associated with the use of boom-mounted anemometers is discussed in Annex D and Clause G.4.

All filtering criteria that are used, and their respective effects on the dataset, shall be recorded and reported.

L.2.4 Principle and requirements of a sensitivity test

The deviation observed between the measurements of the remote sensing device and the reference sensors shall be analysed in terms of their sensitivity to different environmental variables. Depending on the use of the remote sensing device in the power curve test campaign, the accuracy class shall be evaluated in terms of the absolute measurement of the horizontal wind speed component.

An accuracy class of the remote sensing device for alternative applications that entail the acquisition of other wind flow parameters (e.g. turbulence intensity or wind direction) may be derived in terms of the sensitivity of measurements of those parameters to different environmental variables, using suitable reference instrumentation. This is beyond the scope of

a simple⁴⁰ power curve test, and only the evaluation of accuracy class in terms of horizontal wind speed is treated here.

The initial sensitivity to be tested shall relate to the relaxation of the criterion described in item e) in L.2.3. The sensitivity of the deviation between the reference sensors and the remote sensing device on the availability of the remote sensing device within the averaging interval or the corresponding quality factor of the measurements (as defined by the manufacturer) shall be examined. Remote sensing data shall be deemed acceptable if characterised by a level of availability or by a quality factor that has been demonstrated to have no significant influence on the deviation between the reference sensors and the remote sensing device measurements.

The percentage deviation between 10 min averages of the output parameter under consideration acquired by the remote sensing device (RSD) and reference sensors at one height level is considered as a dependent variable which is analysed as a function of one environmental variable by means of a classification test:

$$\begin{array}{l} \text{Dependent} \\ \text{variable:} \end{array} \quad \frac{(v_{\text{RSD}} - v_{\text{reference}})}{v_{\text{reference}}} \times 100 \% \quad (\text{L.1})$$

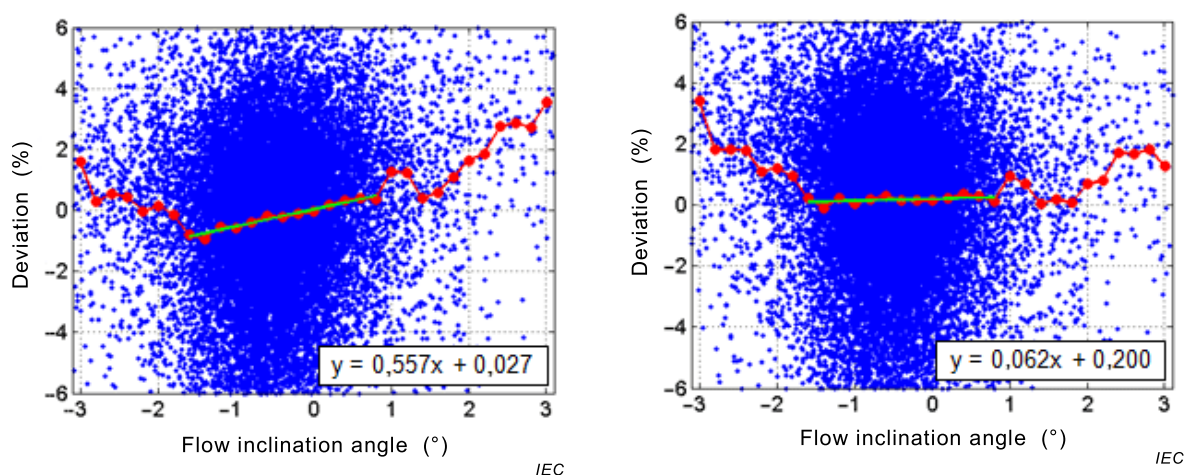
All available environmental variables are considered to be potentially within the scope of the sensitivity analysis. A non-exhaustive list of variables to consider can be: wind shear exponent, turbulence intensity, rain, wind direction, air temperature, air density, temperature difference at two different heights, upflow angle, wind veer, and cloud cover. Some relevant parameters may be instrument-specific, for example data availability or quality factor, and may be specified by the manufacturer.

Sensitivity to an environmental parameter can be an artefact of an easily remedied error in the configuration of the remote sensing device. For example, a marked sensitivity to wind shear can arise when there is a systematic error in the heights associated with the remote sensing device wind speed measurements. If a strong sensitivity is observed with a remote sensing device, or a significant variation in sensitivity between tests is observed, the device should be checked for such errors. If errors are detected and corrected, the sensitivity tests should be repeated.

Where the reference cup anemometer exhibits a known sensitivity to an environmental variable, an attempt should be made to remove the influence of this sensitivity from the sensitivity test. This may be done by any means deemed to be suitable with the requirement that the method and results are adequately documented. As an example, Figure J.1 shows the effect of upflow angle on wind speeds measured by a commonly used class 1,7A cup anemometer as determined from industry standard wind tunnel tests.

Figure L.1 a) shows the response of a remote sensing device to upflow angle determined with respect to data from a cup anemometer of the type represented by Figure J.1. In Figure L.1 b) a linear model has been fitted to the data in Figure J.1 in the region between $\pm 3^\circ$ and used to adjust the data points to remove the effect of the cup anemometer response. It can be seen from the figure that the sensitivity recorded for the remote sensing device in Figure L.1 a) in this case is at least partially attributable to the reference cup anemometer.

⁴⁰ For example, a test that does not incorporate wind veer correction or turbulence normalisation.



a) before adjustment for cup anemometer response b) after adjustment for cup anemometer response

Figure L.1 – Deviation vs upflow angle determined for a remote sensing device with respect to the cup anemometer in Figure J.1

Environmental variables shall be analysed to identify any interdependency. Where this exists, further analysis shall be undertaken to identify which of the environmental variables influences measurement deviation. This may be done by any means deemed to be suitable with the requirement that the method and results are adequately documented. Documentation should include sufficient detail for the replication of results from the data acquired during the classification test. Suggested methodologies for achieving this are detailed in L.2.6. Only environmental variables found to have a direct influence on measurement deviation are to be included in the sensitivity analysis. These variables are then considered to be independent.

If any environmental variables that are known to directly influence measurement deviation are omitted from the sensitivity test, this is likely to result in additional uncertainty at the application stage, as defined in Clause L.5. If subsequent monitoring of the remote sensing device with a short anemometer meteorological mast during the power curve test shows the results of the sensitivity test have been unduly conservative, revision of the environmental variables included in the sensitivity test may be required.

A one-dimensional, two-parametric ordinary least squares (OLS) linear regression analysis shall be performed for each pair of dependent and independent variables. The following parameters are calculated from the regression analysis:

- slope: m ;
- offset: c ;
- coefficient of determination, which in the case of OLS linear regression is the correlation coefficient: r^2 ;
- standard deviation of the independent variable: std ;
- mean value of the independent variable: avg .

The estimation of the slope m and the offset c shall be performed on bin-averaged data for the measured environmental variable, where the size of the bin to be used is given in Table L.1.

Table L.1 – Bin width example for a list of environmental variables

Independent variable	Bin width	Unit
Wind shear exponent	0,05	Dimensionless
Turbulence intensity	0,01	Dimensionless
Rain	0,1	mm
Remote sensing device availability	1	%
Wind direction	5	°
Air temperature	2	°C
Air density	0,05	kgm ⁻³
Temperature gradient	0,002	K/m
Upflow	0,2	°
Wind veer gradient	0,04	°/m

For variables to be included in the sensitivity analysis that are not listed in Table L.1, suitable bin widths should be chosen with respect to range and distribution of the data.

For a specific environmental variable, bins should only be included in the sensitivity test where they meet the criteria listed in Equations (L.2) and (L.3):

$$n_i > \frac{N}{2n_b} \quad (\text{L.2})$$

where

n_b is the number of bins according to the ranges of variables given in Table L.3;

N is the total number of data points;

n_i is the number of data points in bin i .

Equations (L.3) is to be applied only when sensitivities on the wind speed measurement are analysed:

$$\frac{\sigma(d_i)}{\sqrt{n_i}} \frac{v_{\text{ref},i}}{100} < 0,03 \text{ m/s} \quad (\text{L.3})$$

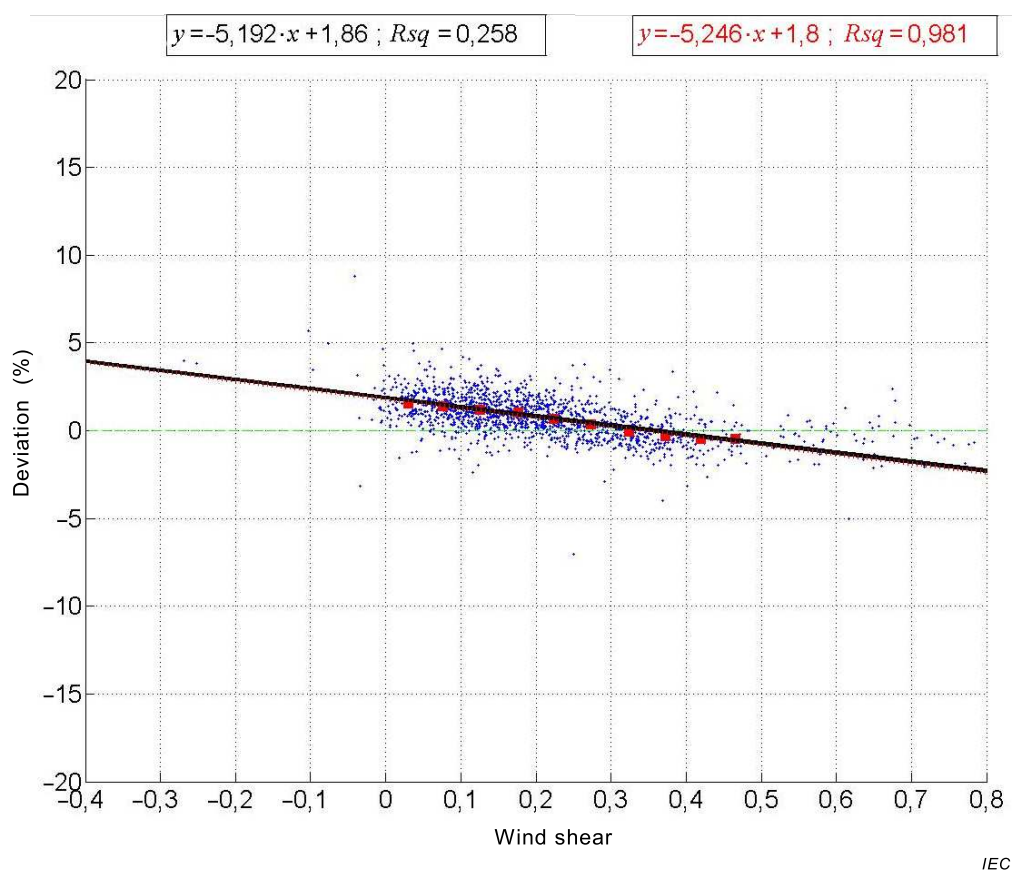
where

d_i is the data in bin i ;

$\sigma(d_i)$ is the standard deviation of the percentage wind speed deviations of the ten minute data in bin i ;

$V_{\text{ref},i}$ is the mean value of the reference wind speed in bin i .

The correlation coefficient (r^2), standard deviation of the independent variables (*std*) and mean value of the independent variables (*avg*) shall be estimated using the 10 min data in the bins included in the sensitivity test.



Linear regressions are plotted for 10 min data (black) and for bin-averaged data (red).

Figure L.2 – Example of sensitivity analysis against wind shear

Sensitivity is defined as the slope multiplied by the standard deviation of the independent variable: $m \cdot std$. The sensitivity indicates the extent, expressed as a percentage, that the deviation between the remote sensing device and the reference sensor measurements is changed by a change in the independent variable of one standard deviation.

Table L.2 – Parameters derived from a sensitivity analysis of a remote sensing device

Height above ground level	Independent variable	<i>avg</i> Independent variable	<i>std</i> Independent variable	<i>m</i>	Sensitivity <i>m</i> × <i>std</i>	<i>r</i> ²	Sensitivity × <i>r</i>
[m]	[-]	[unit variable]	[unit variable]	[%/unit variable]	[%]	[-]	[%]
135	Wind shear exponent	0,21	0,19	−2,324	−0,45	0,235	−0,218
104		0,21	0,2	−1,918	−0,38	0,085	−0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Turbulence intensity	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Rain (yes=1, no=0)	0,02	0,13	0,205	0,03	0,001	0,001
104		0,04	0,19	1,168	0,22	0,028	0,037
72		0,03	0,18	0,499	0,09	0,007	0,008
135	Wind direction	247,28	31,62	−0,007	−0,22	0,059	−0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Air temperature at 131 m	14,66	2,7	0,044	0,12	0,016	0,015
104		14,56	2,66	−0,042	−0,11	0,008	−0,010
72		15,16	3,43	−0,091	−0,31	0,083	−0,089
135	Air density	1,23	0,01	−16,43	−0,24	0,065	−0,061
104		1,23	0,01	1,804	0,03	0	0,000
72		1,22	0,02	5,208	0,08	0,005	0,006
135	Temperature difference between 133 m and 10 m	−0,69	1,36	−0,112	−0,15	0,027	−0,025
104		−0,69	1,36	−0,444	−0,6	0,217	−0,279
72		−0,64	1,53	−0,281	−0,43	0,158	−0,171
135	Upflow angle	0,35	1,37	−0,085	−0,12	0,015	−0,015
72		−0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Wind veer between 133 m and 35 m	15,36	10,01	−0,036	−0,36	0,145	−0,137
104		15,26	10,05	−0,07	−0,71	0,298	−0,388
72		15	9,26	−0,036	−0,33	0,092	−0,100

An example of a sensitivity analysis of a remote sensing device conducted with respect to a variety of environmental parameters is shown above in Figure L.2 and Table L.2. The sensitivity of the device has been analysed at three different heights. Only remote sensing data with availability within the averaging interval of 80 % or more have been considered for the test. As can be seen from Table L.2, and following significance criteria that are defined in L.2.5, the wind shear, turbulence intensity, wind direction, air temperature difference (as simple indicator for stratification), upflow angle and wind veer appear to have a significant influence on the deviation between the remote sensing and reference cup anemometer measurements of wind speed. The other independent variables appear not to be significant. However some variables that appear to influence the performance of the remote sensing device might not have an influence. If their variation is correlated with the variation of some other variables that also have an influence, this correlation may be the reason for their apparent influence. Interdependency between variables shall be analysed to identify which variables exert a genuine meaningful influence as discussed in L.2.6 before estimating the

final accuracy class of the remote sensing device. For example, multivariate regression techniques may be employed to achieve this.

The classification is analogous to the existing classification of cup and sonic anemometers according to this standard as laid out in Annex I and Annex J. The remote sensing device class can be evaluated for either pre-defined conditions or for the specific conditions prevailing during the application of the remote sensing device.

Conditions analogous to the A-classification of cup and sonic anemometry according to this standard as laid out in Annex I and Annex J are presented in Table L.3.

Table L.3 – Ranges of environmental parameters for sensitivity analysis

Independent variable		Max	Min	Range	Source
Wind shear exponent	[-]	0,80	−0,40	1,20	N/A
Turbulence intensity	[-]	0,24	0,03	0,21	This standard
Rain (yes=1, no=0)	[-]	1	0	1	Definition of sensor
Availability	[%]	100	80	20	Definition of filter
Wind direction	[°]	360	0	180	Deviation of 2 directions has a maximum of 180°
Air temperature	[°C]	40	0	40	This standard
Air density	[kg/m ³]	1,35	0,90	0,45	This standard
Temperature gradient From 133 m to 10 m height	[K/m]	0,06	−0,02	0,08	N/A
Upflow angle	[°]	3	−3	6	This standard
Wind veer from 133 m to 35 m height	[°/m]	0,2	−0,2	0,4	N/A

The availability range of the remote sensing device shall be consistent with the range to be applied during deployment in the field. Unless otherwise determined by the configuration of the reference sensors, the limits of the air temperature difference observed between the two height levels indicated shall be 10 times the standard lapse rate between the considered height levels (the standard lapse rate is 0,65 K/100 m) and the wind veer range shall be 4 times the standard deviation of the difference between the 10 minute average wind directions at the heights indicated.

L.2.5 Assessment of environmental variable significance

The significance of a variable is assessed by measuring its degree of influence on the remote sensing device measurement. The sensitivity tests may indicate that no significant relationship exists between the dependent variable and some of the independent variables. Therefore only relevant independent variables shall be considered. Relevance is determined where:

- a sensitivity of at least 0,5 is demonstrated or a product of correlation coefficient r and sensitivity of at least 0,1 is found;
- the sensitivity analysis of an independent variable shall be relevant for all measurement heights if one of the above conditions is fulfilled for a single height.

For a sensitivity of 0,5 or more a significant influence of the independent variable on the accuracy of the remote sensing device is directly measured during the classification test. The correlation coefficient may modify this criterion as it indicates the significance of the relationship between the dependent and independent variables. The correlation coefficient and the sensitivity both indicate the relevance of an independent variable. Thus the product of both measures defines the second, alternative condition in the first item above.

Environmental variables for which the measured range does not cover at least 25 % of the bins as described in Table L.3 with a minimum number of data points as defined by Equation (L.2) should be excluded from the sensitivity analysis. Sensitivity results derived for these variables would be unrepresentative of any relationship with measurement deviation. Although a variable may be eliminated from the sensitivity analysis due to insufficient variation for the reliable establishment of a relationship with measurement deviation, it may be the case that a wider range of variation is observed during application of the device in the course of the power performance test. If the variable in question is found to have an influence on measurement deviation through the monitoring process during application, the device may be rejected. Alternatively, the additional uncertainty will be applied to the results to adequately reflect this, following Clause L.4. Environmental variables that are determined to influence measurement deviation only through their correlation with other environmental variables, as discussed in L.2.6, should be excluded from the sensitivity analysis.

The selection of relevant independent variables for a remote sensing device is illustrated in Table L.4.

Table L.4 – Example selection of environmental variables found to have a significant influence

Height above ground level	Independent variable	<i>avg</i> Independent variable	<i>std</i> Independent variable	<i>m</i>	Sensitivity $m \times std$	r^2	Sensitivity $\times r$
[m]	[-]	[unit variable]	[unit variable]	[%/unit variable]	[%]	[-]	[%]
135	Wind shear exponent	0,21	0,19	–2,324	–0,45	0,235	–0,218
104		0,21	0,2	–1,918	–0,38	0,085	–0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Turbulence intensity	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Wind direction	247,28	31,62	–0,007	–0,22	0,059	–0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Temperature difference between 133 m and 10 m	–0,69	1,36	–0,112	–0,15	0,027	–0,025
104		–0,69	1,36	–0,444	–0,6	0,217	–0,279
72		–0,64	1,53	–0,281	–0,43	0,158	–0,171
135	Upflow angle	0,35	1,37	–0,085	–0,12	0,015	–0,015
72		–0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Wind veer between 133 m and 35 m	15,36	10,01	–0,036	–0,36	0,145	–0,137
104		15,26	10,05	–0,07	–0,71	0,298	–0,388
72		15	9,26	–0,036	–0,33	0,092	–0,100

L.2.6 Assessment of interdependency between environmental variables

The sensitivity analysis in L.2.4 makes the assumption that the environmental variables under consideration are independent, i.e. uncorrelated. In practice this may not be the case. This can lead to entries being registered in the accuracy class for specific variables due to their correlation with other variables rather than through any direct relationship with measurement deviation. An illustration of the effect of correlation between environmental variables can be seen in Figure L.3 and Figure L.4 for wind shear and turbulence intensity. Figure L.3 shows

the relationship between wind shear and turbulence intensity during a classification test. It can be seen that wind shear and turbulence intensity at this test site are not entirely uncorrelated during the measurement period in question. This manifests itself in Figure L.4 as a clustering of the data points within the scatter plot of measurement deviation against turbulence intensity according to the magnitude of the wind shear. This clustering may skew the line fit from which the sensitivity of the device with respect to turbulence intensity is determined. Through this mechanism a relationship in the sensitivity test can be transferred from an environmental variable that is directly correlated to measurement deviation to one that is not if the environmental variables are not mutually independent.

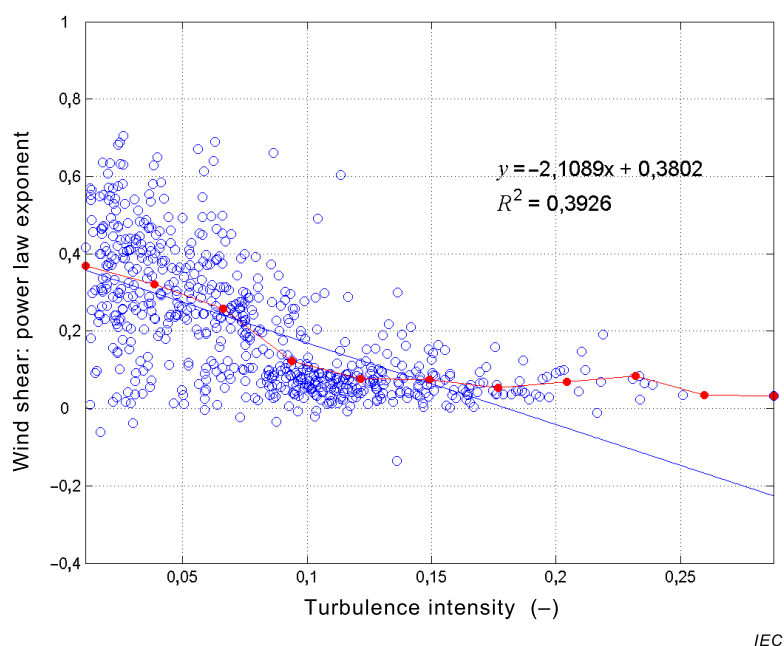
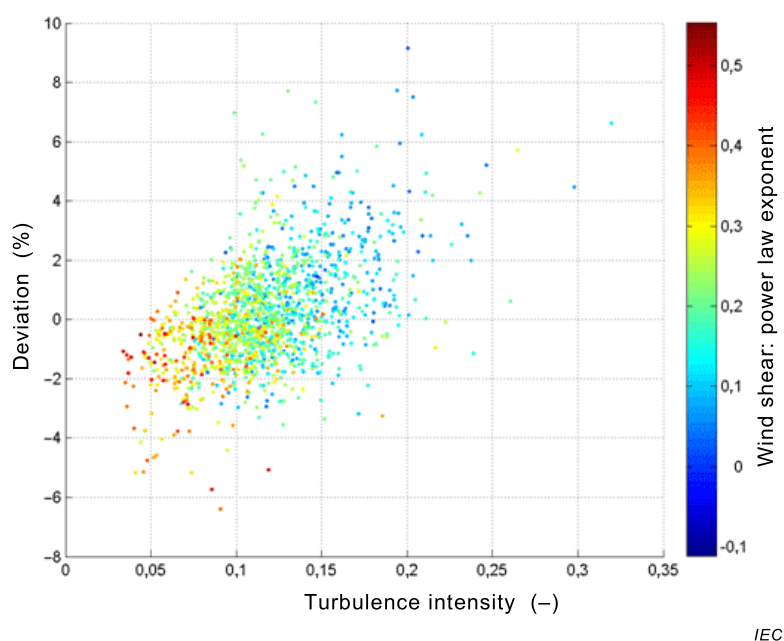


Figure L.3 – Example of wind shear versus turbulence intensity



The colour indicates the wind shear.

Figure L.4 – Example of percentage deviation of remote sensing device and reference sensor measurements versus turbulence intensity

In order to mitigate over estimation of uncertainty, it is necessary to eliminate from the sensitivity analysis any correlated environmental variables that can be demonstrated not to directly influence measurement deviation. An example is shown in Figure L.4, where it is clear the inclusion of both turbulence intensity and wind shear in the calculation of the uncertainty estimate would result in “double counting” of uncertainty contributions due to the relationship evident between them. The elimination of correlated environmental variables may be done by any means deemed suitable with the requirement that the method and results are adequately documented, as discussed in L.2.4. Documentation should include sufficient detail for the replication of results from the data acquired during the classification test.

Dependencies between environmental variables have been analysed for the data used in Table L.4. Variables that do not have a direct influence on the measurement deviation that are correlated with one or more variables that do have a direct influence on measurement deviation have been eliminated from the sensitivity test. After removing the effect of the wind shear from the dataset, the remaining influence of the turbulence intensity was not relevant. The remaining variables are shown in Table L.5. Only wind shear, upflow angle and wind veer appear to have a significant influence on the deviation between the remote sensing and reference cup anemometer wind speed measurements.

Table L.5 – Sensitivity analysis parameters remaining after analysis of interdependency of variables

Height above ground level	Independent variable	<i>avg</i> Independent variable	<i>std</i> Independent variable	<i>m</i>	Sensitivity <i>m × std</i>	<i>r</i> ²	Sensitivity <i>× r</i>
[m]	[-]	[unit variable]	[unit variable]	[%/unit variable]	[-]	[-]	[-]
135	Wind shear exponent	0,21	0,19	–2,324	–0,45	0,235	–0,218
104		0,21	0,2	–1,918	–0,38	0,085	–0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Upflow angle	0,35	1,37	–0,085	–0,12	0,015	–0,015
72		–0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Wind veer between 133 m and 35 m	15,36	10,01	–0,036	–0,36	0,145	–0,137
104		15,26	10,05	–0,07	–0,71	0,298	–0,388
72		15	9,26	–0,036	–0,33	0,092	–0,100

L.2.7 Calculation of accuracy class

The general principle of the calculation of accuracy classes is as follows:

- define ranges of all remaining variables having significant influence as described in the example of Table L.5;
- calculate the maximum deviation of each independent variable on the accuracy of the remote sensing device by multiplication of the regression slope *m* and the range of the independent variable, as taken from Table L.3. An illustrative example is given in Table L.6;
- calculate the accumulated maximum influence of all independent variables on the accuracy of the remote sensing device by considering the different variables as fully independent from each other, such that the maximum measurement errors caused by each individual variable are added in quadrature.

In relation to item c), it is acknowledged that the environmental variables under consideration are not fully independent from each other. However, with respect to uncertainty assessments, the differences between environmental conditions prevailing during the application of the remote sensing device for the purposes of the power curve test and during performance

verification is a key consideration. These differences are highly dependent on the power curve test site and on the RSD performance verification test site. This site dependency decouples the variables from each other with respect to uncertainty calculations. Therefore to estimate the accumulated maximum influence, independence between variables is a necessary assumption, despite the efforts undertaken in L.2.6 for addressing the interdependency of variables.

The preliminary accuracy classes resulting from this scheme are presented in Table L.7. These have been calculated as the sum in quadrature of the maximum deviations of both all and only the individual significant environmental variables according to Table L.6 and Table L.4. The values do not represent the final classification result.

Table L.6 – Example scheme for calculating maximum influence of environmental variables

Height above ground level	Independent variable	Range variable	m	$m \times \text{range}$
[m]	[-]	[unit variable]	[%/unit variable]	[-]
135	Wind shear exponent	1,20	–2,324	2,79
104		1,20	–1,918	2,30
72		1,20	0,607	0,73
135	Turbulence intensity	0,21	8,855	1,86
104		0,21	13,902	2,92
72		0,21	15,812	3,32
135	Rain (yes=1, no=0)	1,00	0,205	0,21
104		1,00	1,168	1,17
72		1,00	0,499	0,50
135	Remote sensing device availability	20,00	0,017	0,34
104		20,00	–0,068	1,36
72		20,00	–0,318	6,37
135	Wind direction	180,00	–0,007	1,28
104		180,00	0,012	2,24
72		180,00	0,003	0,51
135	Air temperature at 131 m	40,00	0,044	1,76
104		40,00	–0,042	1,69
72		40,00	–0,091	3,65
135	Air density	0,45	–16,430	7,39
104		0,45	1,804	0,81
72		0,45	5,208	2,34
135	Temperature difference between 133 m and 10 m	8,00	–0,112	0,90
104		8,00	–0,444	3,55
72		8,00	–0,281	2,25
135	Upflow angle	6,00	–0,085	0,51
72		6,00	0,665	3,99
135	Wind veer between 133 m and 35 m	40,00	–0,036	1,45
104		40,00	–0,070	2,81
72		40,00	–0,036	1,42

Table L.7 – Preliminary accuracy classes of a remote sensing device considering both all and only the most significant influential variables

Height	Accuracy classes	
	Considering all variables	Considering only significant influential variables
[m]	[-]	[-]
135	8,6	3,2
104	7,1	3,6
72	9,7	4,3

To calculate the final accuracy class, the preliminary accuracy class shall be divided by $\sqrt{2}$. The maximum influences as calculated in Table L.6 are valid under the assumption that the performance verification test of the remote sensing device has been conducted at the one extreme of the ranges of all environmental variables while the power curve test is conducted at the opposite extreme, which is considered to be an unlikely scenario. A more likely assumption is that the variables x during both measurements lie close to the centre of the maximum range with a maximum deviation of half of the range:

$$x_{\text{application}} \in \left[x_{\text{centre}} - \frac{x_{\text{range}}}{2}; x_{\text{centre}} + \frac{x_{\text{range}}}{2} \right]$$

$$x_{\text{verification\_test}} \in \left[x_{\text{centre}} - \frac{x_{\text{range}}}{2}; x_{\text{centre}} + \frac{x_{\text{range}}}{2} \right]$$

(L.4)

If the conditions during performance verification and the power curve test are considered independent of each other, the deviations of the environmental variables have the maximum ranges:

$$d(x_{\text{application}} - x_{\text{verification\_test}}) = \sqrt{\left(\frac{x_{\text{range}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{x_{\text{range}}}{2}\right)^2} = \frac{x_{\text{range}}}{\sqrt{2}}$$

(L.5)

The resulting accuracy classes for the influences of variables given as examples in Table L.6 are shown in Table L.8.

Table L.8 – Example final accuracy classes of a remote sensing device

Height	Final accuracy class
[m]	[-]
135	2,3
104	2,5
72	3,0

L.2.8 Acceptance criteria

The classification test shall be performed for a minimum of two devices of the specific type of remote sensing device at a minimum of two different sites. This will enable type-specific classification, provided the results of these tests converge sufficiently. At least one of the test

devices shall be tested at two different sites, resulting in a minimum of three tests required to achieve type classification.

If the results are too divergent an individual unit may be withdrawn on the assumption that it is malfunctioning and is therefore not representative of the instrument type. A withdrawal of a unit on these grounds is subject to the requirements stated above regarding the minimum number of individual units tested to derive a type-specific classification. A type-specific classification is not possible if the withdrawal of units on the grounds that they are malfunctioning results in an insufficient number of tested units. If units are withdrawn, consideration should be given to the number of units withdrawn compared to the number accepted as representative. The reason for withdrawal of a unit from the sensitivity test shall be well justified and reported.

Results of these classifications are considered to converge sufficiently if the order of magnitude of the influence of the environmental variables considered is coherent among the different classification tests (e.g. for each significant independent variable, the magnitude of the sensitivity derived from each individual test differs by no more than 50 % from the mean value).

L.2.9 Classification of RSD

The class is determined from a minimum of three classification tests (2 units at the same location and one unit at 2 different locations).

The final sensitivity slope should be used in Equation (L.7) to calculate the uncertainty. The final slopes result from the combination of the slopes from the various classification tests as follow:

- a) every significant independent variable resulting from every classification test should be considered (i.e. if a variable is found to be significant and independent in one test out of three, it should be considered in the final class).
- b) for every significant independent variable:
 - 1) interpolate the slope to the height of interest for every classification test,
 - 2) combine the slopes from the various classification test using Equation (I.3).

L.3 Verification of the performance of remote sensing devices

Measurements acquired by the remote sensing device shall be calibrated against concurrent and co-located measurements of the same wind flow parameters acquired by meteorological mast-mounted reference sensors which would have been deemed compliant for conducting a power curve test. Depending on the use of the remote sensing device in the power curve test campaign, the accuracy shall be evaluated in relation to those same remote sensing device output parameters considered during the classification test and which are relevant to the power curve test.

The calibration shall be conducted not earlier than one year prior to the start of the power curve test (or during the power performance test) for its results still to be considered valid in relation to the power curve test in which the remote sensing device is being deployed.

Regarding data acquisition and data preparation, the calibration test is conducted in the same way as the sensitivity analysis as described in L.2.2 and L.2.3, with the exception that criterion L.2.2 e) is relaxed, such that it is sufficient to acquire 180 h of data. The requirements on the heights of the reference sensors described in L.2.2 in relation to classification tests also apply to verification tests.

A bin average procedure shall be used to compare the measurements acquired using the remote sensing device and the reference sensors. The bin-wise deviation between the remote

sensing device measurement and the measurement of the reference sensor is considered the key result. The width and centre of the bins shall be as follows⁴¹:

- a) 0,5 m/s wide reference wind speed bins centred on multiple integers of 0,5 m/s shall be applied for the comparison of horizontal wind speeds and the comparison of standard deviation values of the horizontal wind speed;
- b) 5° wide wind direction bins shall be applied for comparison of wind directions, centred on multiple integers of 5°.

The raw data, expressed as 10 min averages, shall be presented as a scatter plot of the measurements acquired by the remote sensing device against the measurements acquired by the reference sensor. In addition, the deviations between the remote sensing device measurements and reference measurements shall be plotted against the reference measurements. These shall be shown on the same plot, an example of which is shown in Figure L.5. For the first scatter plot, the correlation coefficient shall be computed. For the second scatter plot, the mean value and standard deviation of the deviations shall be computed. For both scatter plots, mean values and standard deviations per bin of the dependent variable shall be calculated (Table L.9).

The bin averages of the remote sensing measurements shall be plotted as a function of the bin averages of the reference sensor measurements (Figure L.6). A two-parameter ordinary least squares (OLS) linear regression shall be plotted through the data points that lie within the reference wind speed range 4 m/s to 16 m/s inclusive.

The total uncertainty of the remote sensing device remaining from its calibration test shall be assessed as described in L.4.3 (Figure L.6, Table L.9). The bin-averaged deviations of the RSD measurements and reference measurements shall be compared to the standard uncertainty of the calibration test reduced by the bin averaged deviations as given by the following expression where all components have consistent units:

$$\sqrt{u_{\text{ver},i}^2 - (\bar{V}_{\text{RSD},i} - \bar{V}_{\text{Ref},i})^2}$$

where

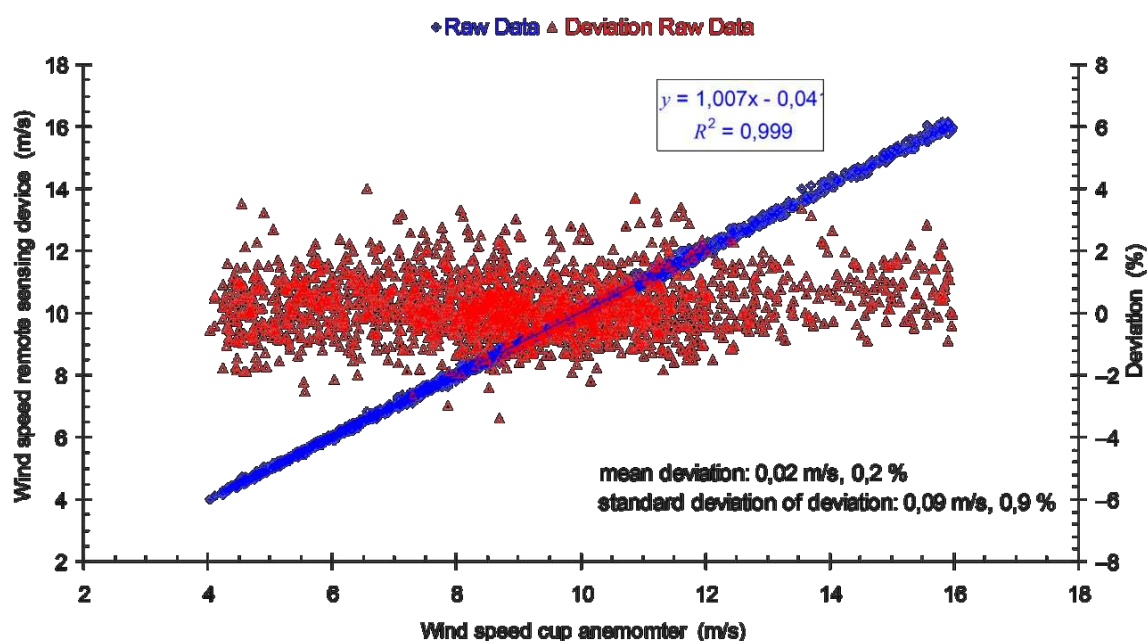
$\bar{V}_{\text{RSD},i}$ bin average of RSD at calibration test in bin i ;

$\bar{V}_{\text{Ref},i}$ bin average of reference measurement at calibration test in bin i ;

$u_{\text{ver},i}$ standard uncertainty of calibration test in bin i according to L.4.3.

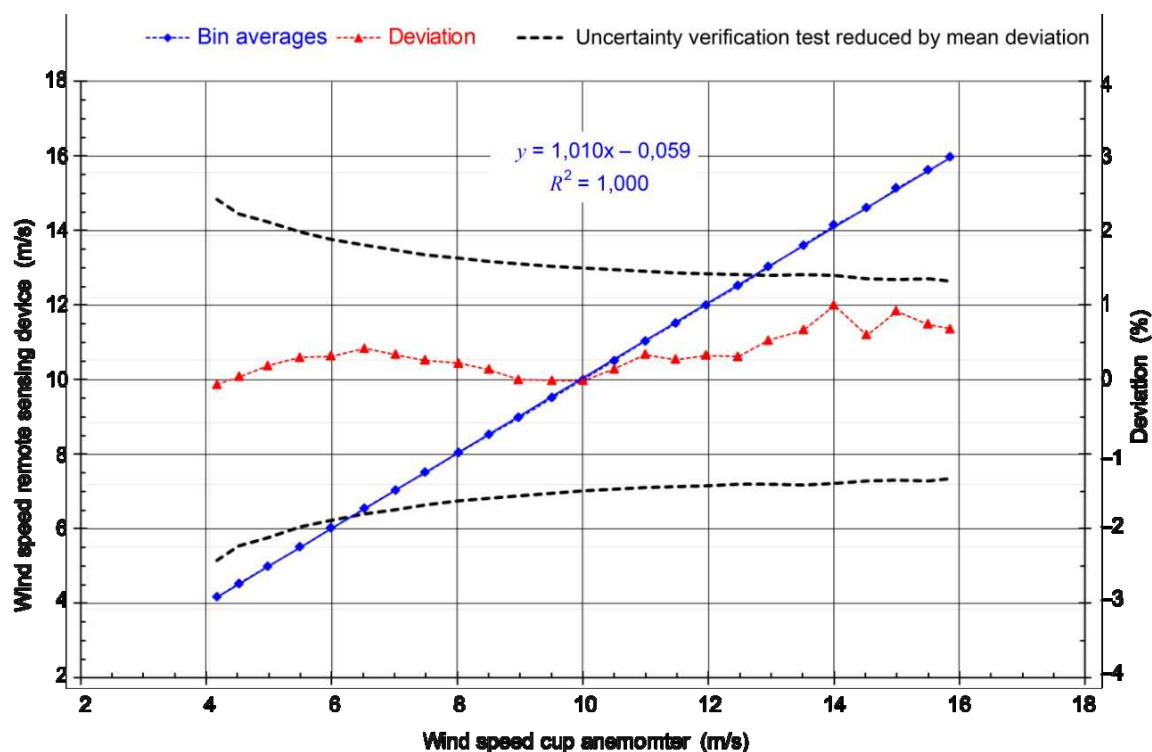
The wind speed measurements of the RSD may be corrected based on the calibration test results in order to remove a bias. Such a correction is recommended if the bin-averaged deviations exceed the above expression (at least in one bin). The wind speed correction may consist of a linear regression of the bin averaged reference sensor measurements versus the RSD measurements.

⁴¹ Comparisons of parameters other than those listed may be desirable in the context of alternative applications of remote sensing. For example, 0,1 m/s wide bins may be used for the comparison of vertical wind speeds and the comparison of standard deviations of the horizontal wind speed, centred on multiple integers of 0,1 m/s, while 1 % (0,01) wide bins may be used for comparison of turbulence intensities, centred on multiple integers of 1 % (0,01).



IEC

Figure L.5 – Comparison of 10 minute averages of the horizontal wind speed component as measured by a remote sensing device and a cup anemometer



IEC

Figure L.6 – Bin-wise comparison of measurement of the horizontal wind speed component of a remote sensing device and a cup anemometer

The considerations discussed in L.2.4 in relation to errors and sensitivities detected during classification tests that are artefacts of incorrect remote sensing device configuration, in particular, the introduction of errors and sensitivities to wind shear as a result of incorrect assignment of measurement heights, should also be considered in the context of calibration tests, see reference [10].

L.4 Evaluation of uncertainty of measurements of remote sensing devices

L.4.1 General

The following components shall be taken into account for the evaluation of the uncertainty of the measurements with remote sensing devices:

- a) uncertainty resulting from the RSD calibration test according to L.4.3;
- b) uncertainty resulting from the classification of the remote sensing device according to L.4.4;
- c) uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume of the remote sensing device according to L.4.5;
- d) uncertainty due to mounting effects of the remote sensing device according to L.4.6;
- e) uncertainty due to variation in flow across the power curve test site according to L.4.7;
- f) a possible uncertainty due to unexpected results of the monitoring of the remote sensing device's accuracy on the application site according to Clause L.5.

The different uncertainty components shall be assumed to be independent from each other and shall be added in quadrature.

L.4.2 Reference uncertainty

The following uncertainty components are considered for the evaluation of the standard uncertainty of the reference sensor (in case of a cup anemometer) and shall be considered to be independent from each other and thus shall be added in quadrature:

- a) wind tunnel calibration;
- b) cup anemometer effects according to the anemometer classification;
- c) cup anemometer mounting effects;
- d) uncertainty of any applied meteorological mast correction to the reference cup anemometer measurements;
- e) uncertainty in the data acquisition system of the reference instrument for the wind speed in bin i .

L.4.3 Uncertainty resulting from the RSD calibration test

The measurements of the remote sensing device are linked to the following systematic uncertainties (category B uncertainties) resulting from the calibration test, which shall be calculated for each bin of the measurement of the remote sensing device:

- a) the standard uncertainty of the reference sensor according to L.4.2;
- b) the mean deviation of the remote sensing device measurements and the reference sensor measurements. If a correction of the measurement of the remote sensing device is performed, the average deviation between the corrected measurements of the remote sensing device and the reference sensor measurements are evaluated;
- c) the standard uncertainty of the measurement of the remote sensing device calculated as the standard deviation of the measurements divided by the square root of the number of data records per bin (category A uncertainty of calibration test);
- d) uncertainty of the remote sensing device due to mounting effects during the calibration test;
- e) uncertainty of the remote sensing device due to non-homogenous flow within the measurement volume during the calibration test according to L.4.5.

Site effects may be considered as an additional uncertainty if the remote sensing device and the reference sensor meteorological mast are separated from each other by a significant distance that compromises compliance with item L.2.2 d). In particular, an additional

uncertainty in wind speed of 1 % times the separation distance divided by the measurement height shall be applied. The separation distance is the distance between the centroid of the measurement volume and the reference sensor being used for the test. The measurement height is the height at which the comparison between the reference sensor and the remote sensing device is being performed. This is not referred to the hub height or rotor diameter of the test wind turbine as these may not be known at the time the classification or calibration tests are being conducted. The additional uncertainties associated with similar issues arising during the power curve test due to the distance of the remote sensing device from the test wind turbine are discussed in L.4.7.

Uncertainties of the data acquisition system of the remote sensing device are automatically integrated in the calibration test results and shall not be considered additionally.

The different uncertainty components shall be assumed to be independent from each other and shall be added in quadrature for each wind speed bin. An example calculation is shown in Table L.9. The total category B uncertainty of the measurements of the remote sensing device resulting from the calibration test shall be taken into account as category B uncertainty of the power curve test in any case.

Table L.9 – Example of uncertainty calculations arising from calibration of a remote sensing device (RSD) in terms of systematic uncertainties

V_{cup}	V_{RSD}	Number of data sets	$V_{RSD\ max}$	$V_{RSD\ min}$	$V_{RSD\ std}$	$V_{RSD\ std/\sqrt{n}}$	Mean deviation	$V_{cup\ uncertainty}$	Mounting uncertainty RSD	$V_{RSD\ uncertainty}$
[m/s]	[m/s]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]
4,133	4,148	15	4,30	4,00	0,090	0,023	0,4	2,3	0,5	2,4
4,528	4,525	33	4,85	4,28	0,139	0,024	0,0	2,2	0,5	2,3
5,064	5,086	26	5,31	4,74	0,141	0,028	0,4	2,0	0,5	2,2
5,538	5,593	47	5,92	5,28	0,166	0,024	1,0	1,9	0,5	2,2
5,985	6,025	44	6,27	5,72	0,141	0,021	0,7	1,9	0,5	2,0
6,513	6,546	45	6,80	6,26	0,158	0,024	0,5	1,8	0,5	1,9
6,995	7,019	87	7,33	6,73	0,151	0,016	0,3	1,7	0,5	1,8
7,500	7,501	109	7,83	7,14	0,156	0,015	0,0	1,7	0,5	1,7
8,010	8,013	118	8,41	7,69	0,160	0,015	0,0	1,6	0,5	1,6
8,512	8,537	145	8,97	8,22	0,183	0,015	0,3	1,6	0,5	1,6
8,993	9,033	146	9,45	8,71	0,176	0,015	0,4	1,5	0,5	1,6
9,498	9,554	121	9,97	9,16	0,171	0,016	0,6	1,5	0,5	1,6
10,008	10,059	166	10,57	9,63	0,181	0,014	0,5	1,5	0,5	1,6
10,506	10,536	106	10,91	10,25	0,141	0,014	0,3	1,5	0,5	1,5
11,003	11,037	78	11,52	10,68	0,185	0,021	0,3	1,4	0,5	1,5
11,502	11,510	59	11,92	11,13	0,188	0,025	0,1	1,4	0,5	1,4
12,000	12,035	63	12,62	11,68	0,217	0,027	0,3	1,4	0,5	1,5
12,519	12,521	68	12,97	12,15	0,182	0,022	0,0	1,4	0,5	1,4
12,957	12,998	64	13,40	12,64	0,186	0,023	0,3	1,4	0,5	1,4
13,469	13,470	40	13,87	13,17	0,177	0,028	0,0	1,4	0,5	1,4
14,011	14,014	25	14,36	13,67	0,192	0,038	0,0	1,3	0,5	1,4
14,444	14,490	30	14,83	14,21	0,172	0,031	0,3	1,3	0,5	1,4
14,983	14,951	14	15,48	14,62	0,246	0,066	-0,2	1,3	0,5	1,4
15,509	15,585	17	15,92	15,38	0,135	0,033	0,5	1,3	0,5	1,4
15,990	16,038	16	16,24	15,77	0,130	0,032	0,3	1,3	0,5	1,4

V_{cup}	V_{RSD}	Number of data sets	V_{RSD} max	V_{RSD} min	V_{RSD} std	V_{RSD} std/ $\sqrt{n}$	Mean deviation	V_{cup} uncertainty	Mounting uncertainty RSD	V_{RSD} uncertainty
16,475	16,479	10	16,69	16,22	0,149	0,047	0,0	1,3	0,5	1,3
17,066	17,140	12	17,50	16,75	0,227	0,065	0,4	1,3	0,5	1,4
17,515	17,682	13	17,91	17,44	0,153	0,042	1,0	1,3	0,5	1,6
18,001	18,020	8	18,32	17,82	0,157	0,056	0,1	1,3	0,5	1,3
18,430	18,549	13	18,82	18,25	0,173	0,048	0,6	1,3	0,5	1,5
18,849	18,980	4	19,16	18,80	0,149	0,075	0,7	1,3	0,5	1,5
19,415	19,430	3	19,67	19,23	0,223	0,129	0,1	1,3	0,5	1,4
The uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume is assumed to be zero.										

It is pointed out that the statistical standard uncertainty of the measurement of a remote sensing device related to single 10-minute averages of a measured variable as resulting from the calibration test is given by the standard deviation of the deviations of the measurements of the remote sensing device and the reference sensor. This uncertainty is significantly higher than the statistical uncertainty of the bin averages of the calibration test described in above bullet point c). However, the statistical uncertainty of single 10-minute averages is automatically included in the category A uncertainty of the bin averages of the evaluated power curve and shall therefore not be accounted for by additional means.

L.4.4 Uncertainty due to remote sensing device classification

Sensitivity of the device due to varying conditions introduces uncertainty due to the fact that the meteorological conditions during the application of the remote sensor may deviate from the meteorological conditions present during the calibration test. The standard uncertainty arising from the accuracy class as determined following L.2.7 will be the final accuracy class number divided by $\sqrt{3}$.

The accuracy class according to L.2.7 represents the maximum measurement error of the remote sensing device due to the influence of environmental conditions within each 10 min period (after the associated calibration test). This uncertainty includes uncertainties due to a variation of the environmental variables around its mean values as present at the power curve test in each wind speed bin. However, the uncertainty due to this variation of the environmental variables at the power curve test is of statistical nature and is fully reflected in the category A uncertainty of the bin averages of the power curve (category A uncertainty of the power curve) and should therefore not be accounted for as category B uncertainty of the wind speed measurement. The category B uncertainty of the wind speed measurement due to the influence of environmental variables on the performance of the remote sensing device should rather take into account only the deviations of the mean values of the environmental variables during the calibration test and the power curve test and should be calculated for each wind speed bin as:

$$u_{VR,class,i} = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot |\bar{x}_{PC,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}| \right)^2} \quad (L.6)$$

where

$u_{VR,class,i}$ is category B standard uncertainty of wind speed measurement in wind speed bin i due to the influence of the environmental variables on the performance of the remote sensing device;

M is number of environmental variables considered to have a relevant influence on the accuracy of the remote sensing device according to the classification test;

m_j	is slope describing the sensitivity of the wind speed measurement of the remote sensing device on the environmental variable j as gained from the combination of the results from a minimum of 3 classification tests;
$\bar{x}_{PC,j,i}$	is mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the power curve test;
$\bar{x}_{ver,j,i}$	is mean value of the environmental variable j in wind speed bin i as present during the calibration test of the remote sensing device.

For relevant environmental variables not measured during the power curve test, the maximum range of that variable as present at the power curve test shall be estimated, and the deviation of the mean values of the environmental variables during the power curve test and during the calibration test in the above equation shall be replaced by the expected maximum absolute deviation of that variable as present during the power curve test from its mean value present during the calibration test divided by $\sqrt{3}$. However, as the classification derivation is based on the assumption of a linear response to perturbations in the independent variables, where the maximum and minimum values of the independent variables during the power curve or calibration test exceed the ranges obtained during the classification sensitivity tests, care should be taken when interpreting the classification uncertainty result. If the calibration test includes the same data as the power curve test, the uncertainty according to L.4.4, becomes equal to zero.

L.4.5 Uncertainty due to non-homogenous flow within the measurement volume

Many remote wind sensing devices assume equivalent wind conditions in regions within the measurement volume that have significant spatial separation. This assumption can be violated in complex terrain. Even in terrain not classified as complex according to this standard, significant errors can occur due to the non-homogeneity of the flow. The uncertainty linked to the assumption of equivalent wind conditions in spatially separated probe volumes shall be assessed. Remote sensing devices should be subject to a rigorous and thorough analysis of the influence of non-uniform flow on measurement bias with reference to their particular configuration.

For example, the combination of a suitable flow model and a model reproducing the remote sensing device horizontal wind speed extraction algorithm might be used to assess the uncertainty due to non-homogeneous flow.

A simplified alternative to estimate this uncertainty applicable to many monostatic systems implemented by observations of the Doppler effect is given by the method used by Bingöl et al., reference [11], with extensions by Albers *et al.*, reference [12].

The user should consult with the remote sensing device manufacturer for the best method for evaluating the uncertainty for their specific device at the test site.

L.4.6 Uncertainty due to mounting effects

The uncertainty of the remote sensing device due to non-ideal levelling of the device shall be estimated. The uncertainty is highly dependent on the type of instrument being used.

L.4.7 Uncertainty due to variation in flow across the site

The same uncertainty as in the application of a mast shall be assumed for this uncertainty, i.e. a standard uncertainty of 2 % in terms of the horizontal wind speed component for a distance range of 2 to 3 rotor diameters and a standard uncertainty of 3 % for a distance range above 3 rotor diameters. When an RSD is used, it is the horizontal distance between the centre of the probe volume of the remote sensing device and the position of the test turbine that shall be considered.

L.5 Additional checks

L.5.1 Monitoring the performance of the remote sensing device at the application site

A meteorological mast reaching at least the minimum of 40 m or the lower tip height of the tested wind turbine shall be applied at the power curve test for monitoring the performance of the remote sensing device. The set-up of the meteorological mast and the remote sensing device and the data preparation shall comply with the requirements described in L.2.2 and L.2.3 with the exception that the meteorological mast has only a relatively small height and may be equipped with reference sensors only at the top of the meteorological mast. The data analysis described in L.5.1 to L.5.3 shall be undertaken.

L.5.2 Identification of malfunctioning of the remote sensing device

Time series plots of the wind measurements (wind speed and wind direction) performed with the meteorological mast shall be compared to time series plots of the measurements of the respective wind measurements of the remote sensing device. In addition scatter plots of the measurements of the wind speed and wind direction of the remote sensing device versus the respective measurements with the meteorological mast shall be inspected. Periods with obvious outlier data or other anomalies shall be excluded from the power curve test.

L.5.3 Consistency check of the assessment of the remote sensing device systematic uncertainties

Note that this subclause does not apply if the RSD calibration is done simultaneously with the power performance measurement. The comparison and analysis of the measurements of the remote sensing device and the reference sensors at common measurement heights as performed for a calibration test according to Clause L.3 shall be repeated with the meteorological mast at the power curve test site for the full duration of the power curve measurement period. It is expected that the absolute value of the mean deviation of the measurements of the remote sensing device and the reference sensor per wind speed bin at the power curve test does not exceed the square root of the sum of the squares of the following uncertainty components:

- the category B standard uncertainty of the measurement of the remote sensing device resulting from the calibration test performed prior to the power curve test assessed in full accordance with L.4.3;
- systematic effects of environmental variables on the performance of the remote sensing device at the power curve test as assessed according to the equation given in L.4.4, taking into account only mean deviations of the influential environmental variables at the power curve test and the calibration measurement prior to the power curve test.

If the absolute value of the mean deviation of the measurements of the remote sensing device and the reference sensor exceeds this expectation in a certain wind speed bin, the difference of the true and expected deviation is considered an additional category B uncertainty component of the measurement of the remote sensing device at the power curve test in that wind speed bin. For the measurement heights of the remote sensing device not captured by the meteorological mast at the power curve test site, this additional uncertainty shall be calculated as follows:

$$u_{\text{added\_systematic},j,i} = u_{\text{added\_systematic},1,i} \frac{u_{\text{systematic},j,i}}{u_{\text{systematic},1,i}} \quad (\text{L.7})$$

where

- $u_{\text{added\_systematic},j,i}$ is added category B standard uncertainty at measurement height j (not covered by the meteorological mast);
- $u_{\text{added\_systematic},1,i}$ is added category B uncertainty at the height of the top of the meteorological mast;

$u_{\text{systematic},j,i}$	is cumulated other category B uncertainties of the remote sensing device at height j ;
$u_{\text{systematic},l,i}$	is cumulated other category B uncertainties of the remote sensing device at the height of the top of the meteorological mast.

The added category B uncertainty shall be cumulated with the other category B uncertainties of the remote sensing device measurements in quadrature.

L.5.4 In-situ test of the remote sensing device

In order to check the consistency of the accuracy of the measurements of the remote sensing device throughout the power curve measurement campaign, the meteorological mast present at the test site may be used to perform an in-situ test of the remote sensing device similar to the in-situ test defined in Annex K. If in-situ testing is performed, it shall be done for all common measurement heights covered by the meteorological mast and the remote sensing device.

A successful in-situ test can replace a repetition of the calibration test after the power curve test.

L.6 Other requirements specific to power curve testing

Before using the remote sensing device for power curve measurements, a classification test according to Clause L.2 and a calibration test according to Clause L.3 shall be performed. Alternatively, the calibration test can be performed during the power curve test. If the calibration test is not performed at the power curve test site, the remote sensing device shall either be stored or shall be directly transported to the location where the power curve campaign shall take place at the end of the calibration test. A repetition of the calibration test shall be performed after the power curve test. As an alternative, an in-situ test of the remote sensing device against the meteorological mast present at the power curve test site can be performed. Deviations of the calibration test methodology or of such deviations implied by the in-situ test shall be treated like deviations of cup anemometer calibrations as defined in this standard.

If a measurement height required for the power curve test is between two measurement heights available from the calibration test or the classification test, linear interpolation of the results of the calibration test or of the classification test according to the height shall be performed. Linear extrapolation⁴² of the results of the calibration test or of the classification test should not be performed. If the measurements required for the calculation of the rotor equivalent wind speed extend beyond the height range covered by the calibration test or the classification test, a higher uncertainty than the uncertainty pertaining to the nearest height covered by the calibration test or the classification test shall be considered.

In some cases it is helpful to carry out a site calibration in terrain which is sufficiently non-complex to satisfy the requirements of Annex B. If the remote sensing device is used in conjunction with a site calibration measurement, the measurement volume shall be centred horizontally within 10 m or 10 % of the hub height H of the reference meteorological mast, whichever is larger. Where a site calibration is not required, the remote sensing device may be situated consistent with the requirements of 6.3.2. In both cases, when acquiring hub height wind speed measurements, the extremes of the measurement volume at hub height H shall not lie closer to the test wind turbine than $2D$, where D is the rotor diameter, and the centroid of the measurement volume shall not lie further than $4D$ from the test wind turbine. This is illustrated in Figure L.7, where an inverted conical scan geometry is used for illustrative purposes only: this guidance is not limited to this particular scan geometry. The extremes of the measurement volume at all heights evaluated for the power curve test shall

⁴² Other types of extrapolation are permitted as long as they are conservative.

lie outside a sphere centred at the position and hub height of any wind turbine with a radius of 2 rotor diameters of the respective wind turbine.

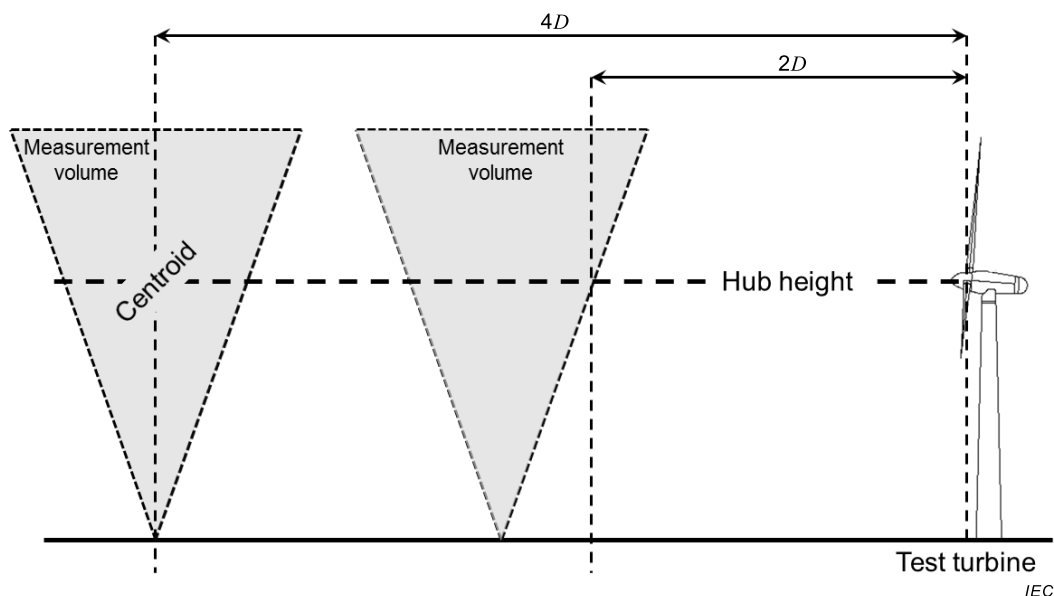


Figure L.7 – Example of permitted range of locations for measurement volume

Probe volumes within which the remote sensing device acquires a radial velocity measurement shall be free of wakes and flow perturbation from wind turbines and obstacles as defined in Annex A. For clarity:

- a) the measurement volume is the region within which wind flow characteristics can influence a wind speed measurement and is defined by the scan geometry, device configuration or arrangement of the multiple beams penetrating the volume in order to acquire that measurement;
- b) the probe volume is the region from which a single constituent physical measurement of, for example, Doppler shift, radial or line of sight velocity, is acquired, several of which are typically required to derive a wind speed measurement. The probe volume is a characteristic of the basic physical interaction of the remote sensing device with the atmosphere, rather than the wind speed measurement derived from these interactions, which is determined by the flow within the measurement volume.

Device-specific measures should be undertaken according to the advice and guidance of the manufacturers of the remote sensing device employed. The aim is to comply with the general requirements in measurement height.

The same remote sensing device configuration, operating parameters, software/firmware and performance related hardware components shall be used during the power curve test as were used during device classification and during the calibration test. No major changes shall be implemented that might affect performance between calibration, classification and power curve test.

If the meteorological mast available for the power curve test does not reach hub height, the atmospheric pressure measured by the meteorological mast instruments shall be adjusted to hub height following this standard. Furthermore, the air temperature will be adjusted to hub height assuming that the atmosphere varies according to ISO 2533:1975. An alternative method is to mount a temperature sensor on the wind turbine nacelle. The sensor shall be mounted at least one meter (1 m) above the nacelle and upwind of any existing ventilation systems. The effects of the nacelle on the sensor shall be mitigated in accordance with the international standard IEC 61400-12-2.

The following measurements are required for the power curve test, the calibration test and for the classification test if the remote sensing device requires respective data filtering for the provision of accurate measurements:

- a) measurement of precipitation;
- b) measurement of cloud height;
- c) measurement of ambient acoustic noise level.

The need for such measurements shall be reasonably assessed during the classification test.

L.7 Reporting

L.7.1 Common reporting on classification test, calibration test, and monitoring of the remote sensing device during application

The reports on the classification test, on the calibration test and on the monitoring of the remote sensing device during the application shall include the following common contents:

- a) all details of the set-up of the reference measurement and all details of the test site as required for a power curve test;
- b) all details of the set-up of the remote sensing device, including exact position of the remote sensing device, relative position to reference meteorological mast, orientation, version and set-up of operating software, pitch and roll angle and its monitoring;
- c) serial number and type of the remote sensing device;
- d) measurement period;
- e) description of data analysis including filtering;
- f) presentation of raw data as described in Clause L.3;
- g) bin-wise analysis of measurement of remote sensing device versus reference measurement including graphical and tabular documentation as described in Clause L.3 and L.4.3;
- h) analysis of uncertainty of reference measurements, where applicable in accordance to L.4.2;
- i) environmental conditions during the test remaining after all data filtering: At least all variables having a significant influence on the accuracy of the remote sensing device as resulting from the classification test shall be documented. Each of these variables shall be plotted as a function of the wind speed at the evaluation height and shall be bin-averaged against this wind speed using bins with a width of 0,5 m/s centred on multiple integers of 0,5 m/s. In addition, the distribution of these variables shall be shown. For the performance monitoring at the power curve test, this documentation is limited to the available measurements of environmental conditions;
- j) all calibration certificates of all reference sensors and of the data acquisition system.

L.7.2 Additional reporting on classification test

The report about the classification test shall contain in addition to the items given in L.7.1:

- a) scatter plots of 10 min data and bin averages related to the sensitivity analysis for all considered variables as detailed in L.2.4;
- b) description and reasoning of the selection of considered environmental variables;
- c) complete documentation of the process of the identification and elimination of insignificant environmental variables;
- d) complete documentation of the process of the investigation of inter-correlations of the considered environmental variables;
- e) sensitivity parameters, sensitivities, correlation coefficients, mean values and standard deviations of all variables considered according to Clause L.2;

- f) ranges of environmental variables considered for the classification;
- g) choice of the classification method;
- h) classification results for the parameter ranges defined in Table L.3.

L.7.3 Additional reporting on calibration test

The report about the calibration test shall contain in addition to the items given in L.7.1:

- a) standard uncertainty of the remote sensing device resulting from the calibration test according to L.4.3;
- b) if the calibration test is repeated after the power curve test: comparison of results of calibration tests and consequences of the comparison;
- c) additional reporting on monitoring of remote sensing device during application;
- d) any anomalies of the measurements according to L.5.2;
- e) amount and periods of data filtered out based on data check according to L.5.2;
- f) uncertainty analysis according to L.4.3 and L.4.4;
- g) bin-wise representation of evaluation criteria according to L.5.3 and added uncertainty;
- h) training and test period, results and consequences of in-situ test, so far performed.

L.7.4 Additional reporting on application

The report about the application shall contain in addition to the items given in L.7.1:

- a) full uncertainty assessment of measurements of the remote sensing device according to Clause L.4;
- b) realisation of air density measurements and description of associated data corrections to hub height.

Annex M

(informative)

Normalisation of power curve data according to the turbulence intensity

M.1 General

Wind turbine power curves are influenced by turbulence intensity. A significant part of the turbulence intensity effect is caused by the averaging of the measured power output and the measured wind speed over 10 min periods. This can be understood from the non-linear relationship between the power output and the wind speed: In the wind speed range where the power output increases proportionally with the wind speed (ankle of the power curve), the 10 min averaging leads to an increase of the power output with increasing turbulence intensity. This is typically the case at low wind speeds and at wind speeds around the maximum power coefficient. In the wind speed range where the power output increases less than proportional with the wind speed (knee of the power curve), the 10 min averaging leads to a decrease of the power output with increasing turbulence intensity. This is typically the case at the knee of the power curve at wind speeds just below rated wind speed.

Annex M describes a procedure for normalising power curve data to a reference turbulence intensity (see references [13] and [14]). The reference turbulence intensity can be defined as a function of the wind speed. The given procedure considers only the effect of 10 min averaging of the measurement data. Other turbulence effects on the wind turbine power output are not covered by the method. It is recommended to apply the turbulence normalisation procedure to make power curves measured at different turbulence intensities more comparable to each other.

The turbulence normalisation procedure outlined here makes simplifying assumptions such as the wind turbine follows, at each instant, a certain power curve, which is independent of the turbulence intensity, and the assumption that the wind speed fluctuations relevant for the entire rotor area within a 10 min period are adequately characterised by the turbulence intensity at hub height. Despite the simplicity of these assumptions, the method enables the adjustment of the effect of 10 min averaging for a large variety of wind turbine types, rotor sizes and turbulence ranges.

A procedure for the estimation of uncertainties linked to the effects of turbulence on power curves both for the case of turbulence normalisation and for the case that no turbulence normalisation is performed is given in Clause M.5. The suggested uncertainty calculation is also intended to cover contributions to power curve test uncertainties due to turbulence effects not related to the 10 min averaging.

M.2 Turbulence normalisation procedure

It is assumed for the turbulence normalisation that at each instant the wind turbine follows a certain power curve, here defined as zero turbulence power curve. The determination of the zero turbulence power curve is described in Clause M.3. Figure M.1 illustrates the turbulence normalisation process.

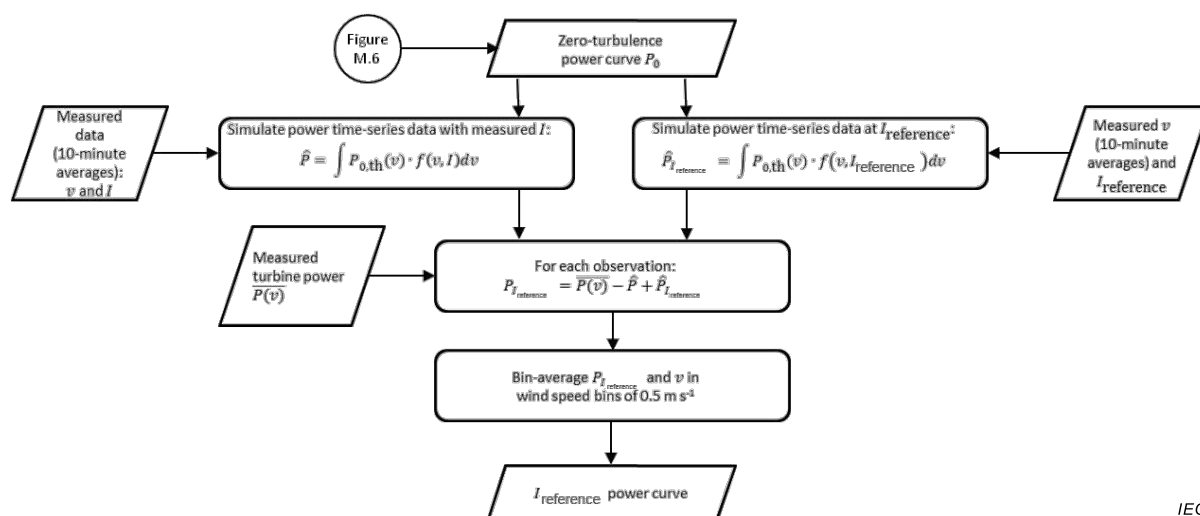


Figure M.1 – Process for obtaining a power curve for a specific turbulence intensity ($I_{\text{reference}}$)

Based on the zero turbulence power curve and wind speed distribution within a 10 min period, the 10 min average of the wind turbine power output can be simulated by the following equation:

$$\overline{P_{\text{sim}}(v)} = \int_{v=0}^{\infty} P_{I=0}(v) \cdot f(v) dv \quad (\text{M.1})$$

where

$f(v)$ is the wind speed distribution within 10-minute period;

$P_{I=0}(v)$ is the zero turbulence power curve;

$P_{\text{sim}}(v)$ is a simulated 10 min average of measured power output.

Equation (M.1) shall be applied to power curve data (every 10 min period) to calculate two simulated power outputs for the following conditions:

- 1) The wind speed distribution as measured in the 10 min period at hub height. A Gaussian distribution $f(v)$ may be assumed, which is fully determined by the average wind speed and the standard deviation of the wind speed as recorded within the 10 min period. In case of a wind turbine with active power control, Equation (M.1) shall be evaluated for the air density normalised hub height wind speed. The standard deviation to be applied is calculated as the product of the measured turbulence intensity (standard deviation of wind speed divided by the average wind speed at hub height) and the air density normalised average wind speed (at hub height);
- 2) A Gaussian wind speed distribution with the 10 min average of the wind speed measured at hub height and a standard deviation equal to the product of the 10 min average of the wind speed measured at hub height and the reference turbulence intensity. In case of a wind turbine with active power control, Equation (M.1) shall be evaluated for the air density normalised wind speed (at hub height).

The measured power output is then normalised to the reference turbulence intensity by the following equation:

$$\overline{P_{I_{\text{ref}}}(v)} = \overline{P(v)} - \overline{P_{\text{sim},I}(v)} + \overline{P_{\text{sim},I_{\text{ref}}}(v)} \quad (\text{M.2})$$

where

$\overline{P(v)}$ is the 10 min average of measured power output;

$\overline{P_{\text{sim},I}(v)}$ is the simulated 10 min average of measured power output according to the above condition 1: Equation (M.1) applied for the measured wind speed distribution (measured average wind speed and measured turbulence intensity);

$\overline{P_{\text{sim},I_{\text{ref}}}(v)}$ is the simulated 10 min average of measured power output according to the above condition 2: Equation (M.1) applied for the measured average wind speed and for the reference turbulence intensity I_{ref} by assuming a Gaussian wind speed distribution.

In case of a stall-regulated wind turbine, Equation (M.2) shall be applied with the air density normalised measured power output.

The power coefficient data (as applied only for graphical demonstration of the measurements) shall be calculated on the basis of the power output normalised to the reference turbulence intensity. In case of a stall-regulated wind turbine, the power coefficient data shall be calculated on the basis of the power output normalised to the reference turbulence intensity and on the basis of the reference air density (not on basis of the measured air density).

M.3 Determination of the zero turbulence power curve

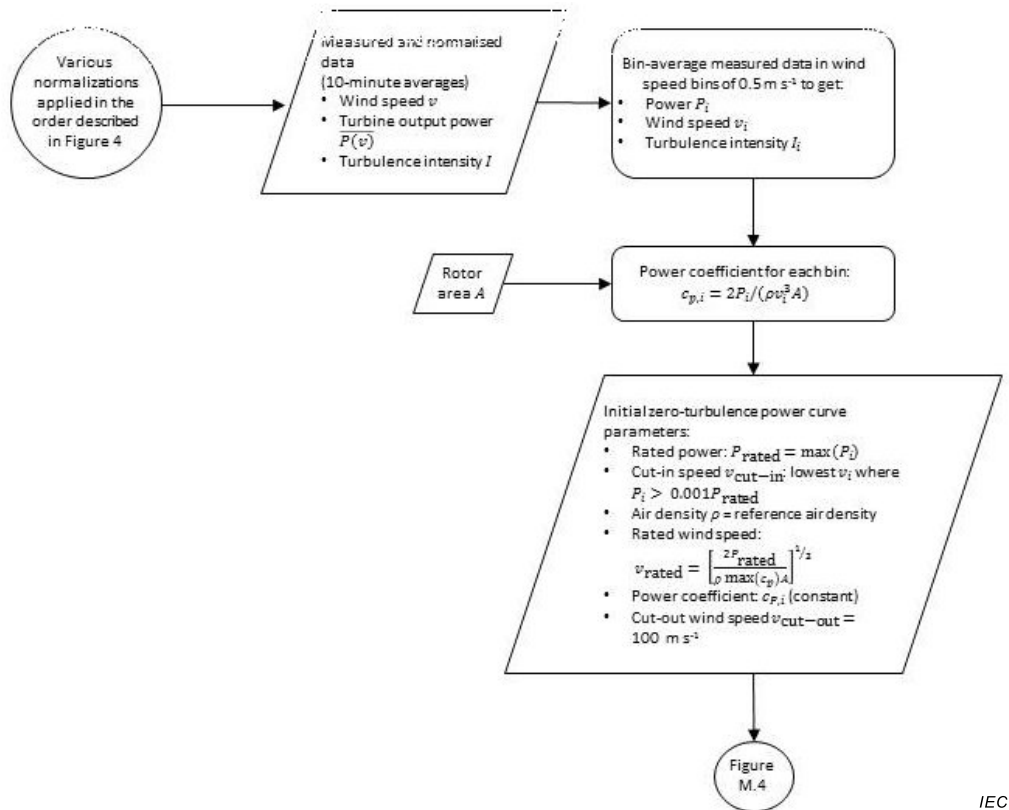
An initial zero turbulence power curve is calculated on the bin-averaged power curve normalised according to the air density, but not normalised according to the turbulence intensity and not corrected according to the wind shear. The initial zero turbulence power curve is determined as a first approach as follows (see also Figure M.2 and Figure M.3):

- a) assumption of zero power output below cut-in wind speed. As a first approach, the cut-in wind speed is set to the average wind speed of the wind speed bin, where the measured power output reaches at least 0,1 % of the rated power;
- b) assumption of constant power coefficient $c_{P,\text{max}}$ equal to the maximum power coefficient $c_{P,\text{max}}$ between cut-in wind speed and rated wind speed. This assumption is equal to an increase of the power output with the third power of the wind speed. The initial zero turbulence power curve shall be calculated with this assumption and on the basis of the reference air density between the cut-in wind speed and the rated wind speed in increments not larger than 0,1 m/s. As a first approach, the maximum power coefficient $c_{P,\text{max}}$ shall be set to the maximum power coefficient of the measured bin-averaged power curve;

- c) calculation of rated wind speed v_{rated} from rated power P_{rated} , rotor swept area A , maximum power coefficient $c_{P,\text{max}}$ and reference air density ρ by:
$$v_{\text{rated}} = \left(\frac{2 \cdot P_{\text{rated}}}{\rho \cdot c_{P,\text{max}} \cdot A} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

As a first approach, the rated power is set to the highest bin-averaged power output of all wind speed bins;

- d) power output equal to rated power for wind speeds above rated wind speed v_{rated} . As a first approach, the rated power is set to the highest bin-averaged power output of all wind speed bins of the measured power curve. This rated power output shall be assumed for wind speeds far above cut-out wind speeds (e.g. 100 m/s) for the definition of the initial zero turbulence power curve.



IEC

Figure M.2 – Process for obtaining the initial zero turbulence power curve parameters from the measured data

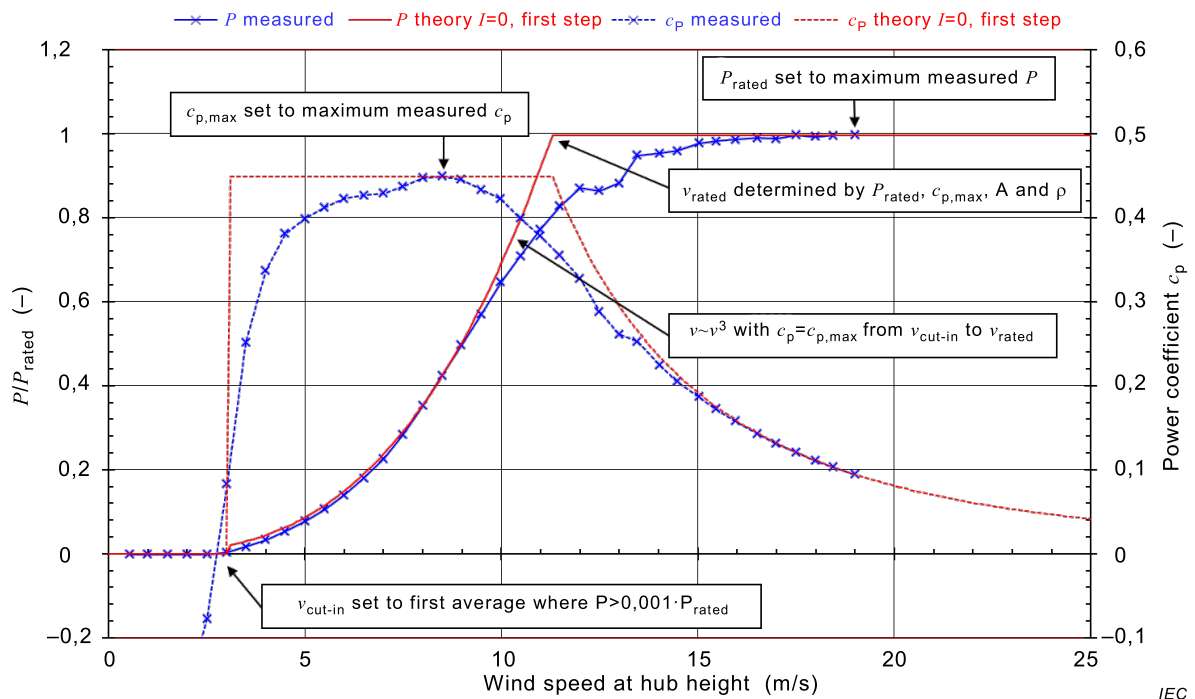


Figure M.3 – First approach for initial zero turbulence power curve

In the next step, the rated power, the cut-in wind speed and the maximum power coefficient of the initial zero turbulence power curve shall be adjusted because these three parameters are dependent on the turbulence intensity and because values for these parameters have been applied in the previous step instead the values corresponding to the turbulence intensity of zero. A bin-average of the measured turbulence intensity as a function of the wind speed measured at hub height shall be performed. In case of a wind turbine with active power control, the turbulence intensity shall be bin averaged according to the air density normalised wind speed at hub height.

The initial zero turbulence power curve shall be integrated over a Gaussian wind speed distribution according to Equation (M.1) with the average wind speed equal to the bin average of the measured power curve and with the standard deviation calculated as product of the bin-averaged wind speed and the bin averaged turbulence intensity. The air density normalised wind speed at hub height shall be applied in case of a wind turbine with active power control. By this procedure, the power curve is simulated for each wind speed bin for the measured turbulence intensity, while the simulated power curve refers to exactly the same wind speed bins than the measured power curve. The rated power, the cut-in wind speed and the maximum power coefficient of the initial zero turbulence power curve shall then be adjusted as follows (see Figure M.4):

- a) the rated power shall be adjusted such that the maximum power of the simulated power curve fits the maximum bin averaged power of the measured power curve;
- b) the cut-in wind speed shall be adjusted such that the cut-in wind speed of the simulated power curve fits the cut-in wind speed of the bin averaged measured power curve. Cut-in wind speed is for both power curves defined as lowest wind speed bin where the power output reaches at least 0,1 % of the rated power;
- c) the maximum power coefficient shall be adjusted such that the maximum power coefficient of the simulated power curve fits the maximum power coefficient of the measured power curve.

Steps a) to c) above shall be all three repeated at every iteration, in the given order, until the three parameters converge at least as follows:

- a) the maximum power of the simulated power curve deviates from the maximum bin averaged power of the measured power curve by no more than 0,1 %;
- b) the cut-in wind speed of the simulated power curve deviates from the cut-in wind speed of the bin averaged measured power curve by no more than 0,5 m/s;
- c) the maximum power coefficient of the simulated power curve deviates from the maximum power coefficient of the measured power curve by no more than 0,01.

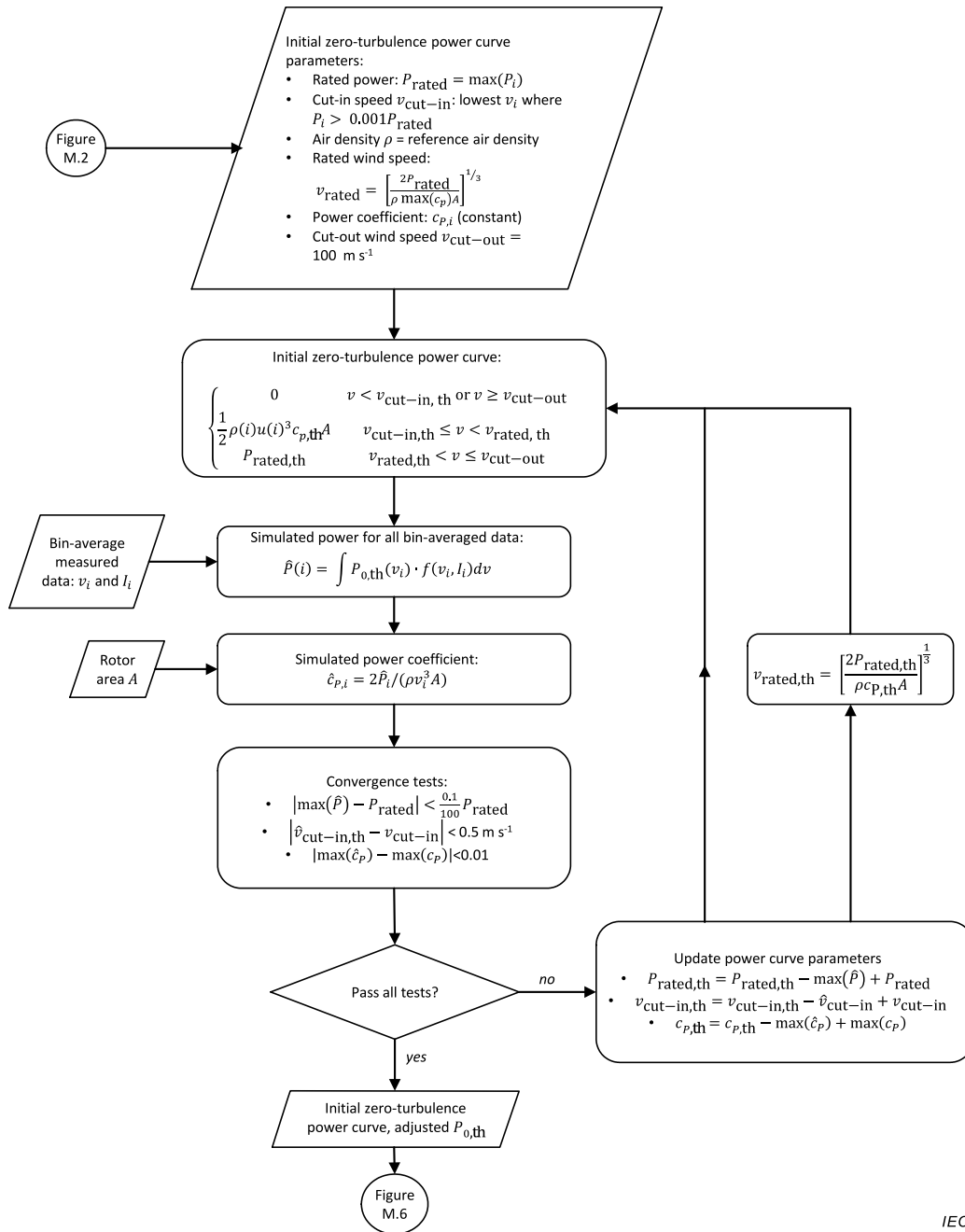


Figure M.4 – Process for obtaining the theoretical zero-turbulence power curve from the measured data

Sufficient convergence is normally reached after the first or second iteration. Figure M.5 illustrates how the adjustments normally change the initial zero turbulence power curve from the first step.

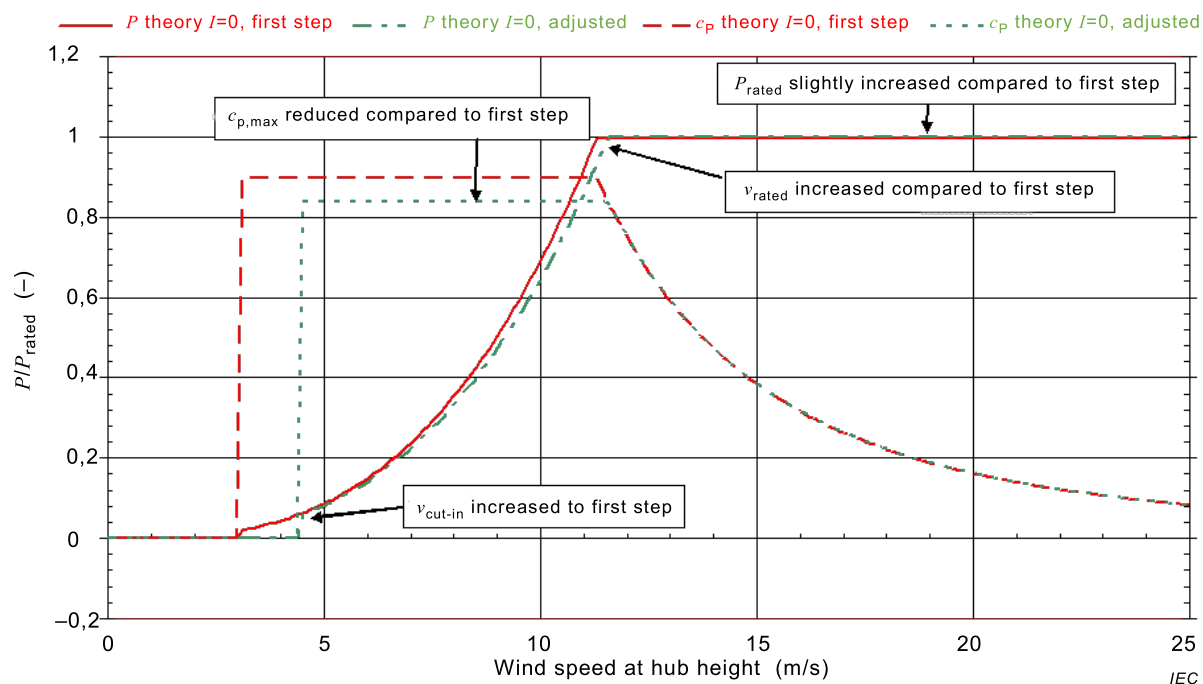
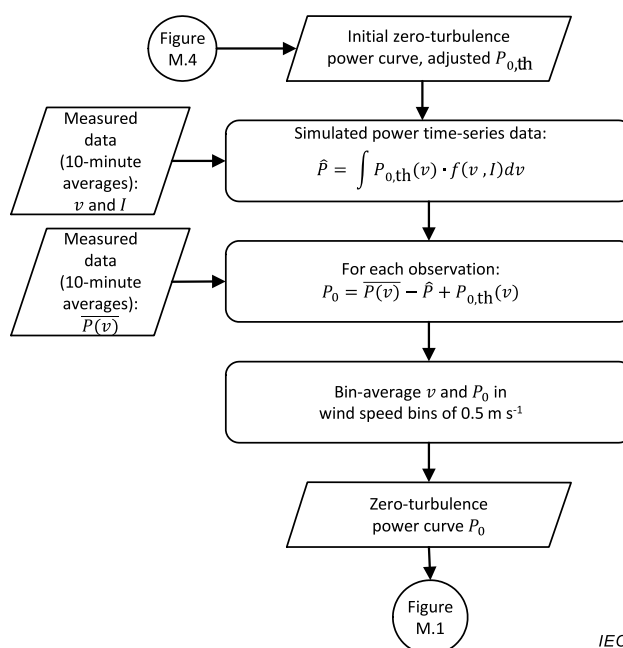


Figure M.5 – Adjusted initial zero turbulence power curve (green) compared to first approach (red)

The zero turbulence power curve shall then be determined by applying the data normalisation process described in Clause M.2 with the zero turbulence power curve set to the initial zero turbulence power curve in Equation (M.1) and by assuming a turbulence intensity of zero (constant wind speed during 10 min period). The final zero turbulence power curve is gained by bin-averaging the so normalised power curve raw data as illustrated in Figure M.6. This bin-averaged power curve shall be extended with the power output of the highest bin to wind speeds far above cut-out wind speeds (e.g. 100 m/s) when applying Equations (M.1) and (M.2) for turbulence normalisations.



IEC

Figure M.6 – Process for obtaining the final zero-turbulence power curve from the measured data

Figure M.7 illustrates how the final zero turbulence power curve typically compares to the initial zero turbulence power curve.

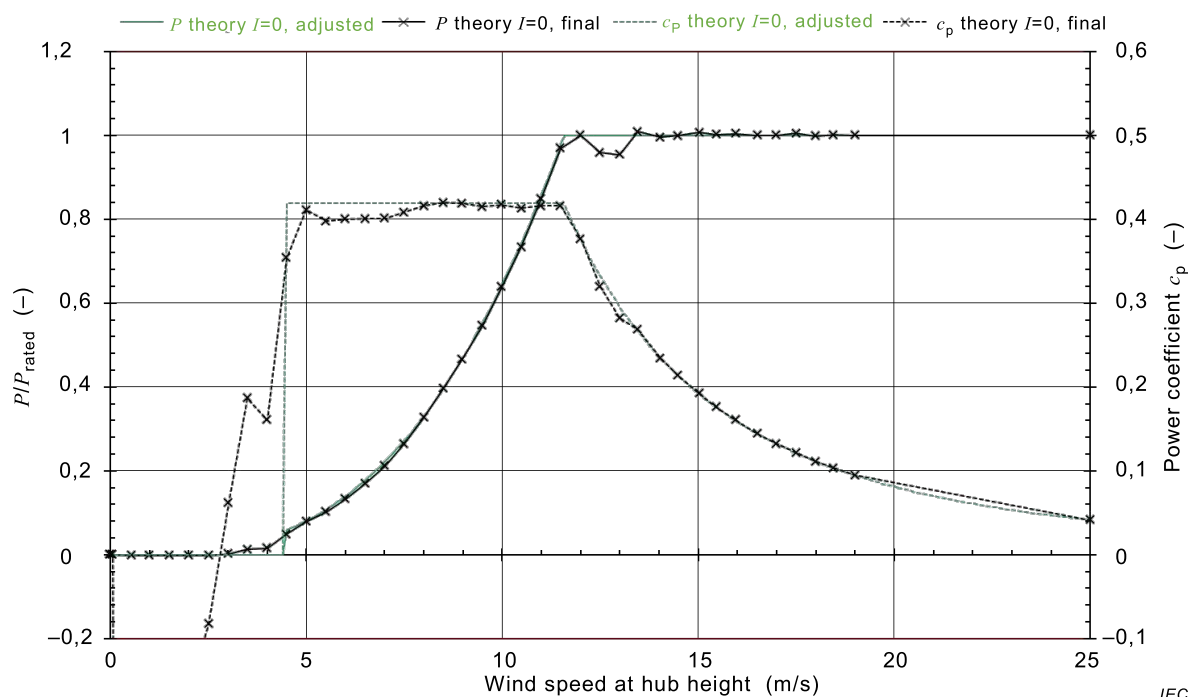


Figure M.7 – Adjusted initial zero turbulence power curve (green) compared to final zero turbulence power curve (black)

M.4 Order of wind shear correction (normalisation) and turbulence normalisation

The order of the application of the wind shear or wind veer correction (or normalisation) and the turbulence normalisation normally has no major influence on the final power curve. It is more convenient to apply the turbulence normalisation only on the basis of the hub height wind speed, as it is described in Clause M.2 and M.3, although it could also be applied on the basis of the wind shear- or wind veer-corrected (or-normalised) wind speed when wind speed measurements over the entire rotor height allow applying the wind shear correction. At the end, the final power shall be calculated by bin-averaging the turbulence-normalised power output against the wind shear- or wind veer-corrected (or-normalised) wind speed. In case of a wind turbine with active power control, the wind shear corrected (wind shear normalised) wind speed shall be normalised according to the air density prior to the bin-averaging. In case of a stall-regulated wind turbine, the turbulence-normalised power output according to Clause M.2 is already corrected for the air density.

M.5 Uncertainty of turbulence normalisation or of power curves due to turbulence effects

The turbulence normalisation given in Clause M.2 and M.3 is designed to handle effects of the 10 min data averaging on the evaluated power curve. There are further effects of the turbulence intensity on wind turbine power curves, which could, for instance, be due to direct impact of the turbulence intensity on the aerodynamics or due to the 3-dimensional character of turbulence. In the end, the turbulence intensity normalisation is a strongly simplified approach for characterising short term wind speed fluctuations. Thus, there is a remaining uncertainty of the evaluated power curve due to possible turbulence effects, even if the turbulence normalisation procedure is applied. The turbulence normalisation often removes about half of the observed effect of the turbulence intensity on measured wind turbine power

curves. Thus, the following steps should be performed in order to calculate the uncertainty of the turbulence normalisation:

- a) the final bin-averaged power curve shall be evaluated on the basis of the turbulence normalised power output and on the basis of the non-turbulence normalised power output;
- b) the deviation of these two power curves shall be assumed to be the maximum uncertainty of the turbulence-normalised power curve per wind speed bin resulting from the turbulence normalisation. The standard uncertainty resulting from the turbulence normalisation per wind speed bin shall be calculated as the deviation of the power curves divided by $\sqrt{3}$. The standard uncertainty shall be combined with the other uncertainties of the power performance measurement for the determination of the total standard uncertainty according to Annex D.

The uncertainty of turbulence effects on the measurement shall also be taken into account if no turbulence normalisation is performed, the uncertainty is higher, as the power curve is valid only for the turbulence conditions present during the power performance test and not for a reference turbulence intensity deviating from the test conditions. Thus, if no turbulence normalisation is applied, the following estimation of uncertainty due to turbulence effects is recommended:

- 1) two turbulence normalised power curves shall be evaluated according to Clause M.2 and M.3 just for the determination of the uncertainty. First, the power curve shall be normalised to an extremely low turbulence intensity, second, the power curve shall be normalised to an extremely high turbulence intensity. If the user does not have pre-defined extreme turbulence intensity limits, the turbulence intensities 0,05 and 0,15 shall be considered as the extreme turbulence intensities for the two power curve normalisations;
- 2) the deviation of the two normalised power curves shall be assumed to be half of the maximum uncertainty due to turbulence effects. The standard uncertainty resulting from the turbulence normalisation per wind speed bin shall be calculated as the deviation of the two normalised power curves multiplied by the factor $.2/\sqrt{3}$. The standard uncertainty shall be combined with the other uncertainties for the determination of the total uncertainty of the power curve according to Annex D;
- 3) if the measured power curve shall be compared with a power curve that refers to a certain (possibly wind speed dependent) turbulence intensity (e.g. a warranted power curve) and no power curve normalisation is performed, the two extreme turbulence intensities applied in step 1) shall be replaced by the bin-averaged measured turbulence intensity and by the reference turbulence intensity of the to be compared power curve for the uncertainty calculation.

Annex N (informative)

Wind tunnel calibration procedure for wind direction sensors

N.1 General

This procedure describes the calibration method of wind direction sensing devices including wind vanes and sonic anemometers operating as wind direction sensing devices.

N.2 General requirements

The general requirements for the calibration of wind direction sensors are summarized as follows:

- a) the calibration of the wind direction sensor shall be carried out in an operating wind tunnel that is suitable for the calibration of wind direction sensors;
- b) the calibration facility shall be accredited in accordance with ISO/IEC 17025, the standard for testing and calibration laboratories;
- c) all transducers and measuring equipment relevant for the calibration of wind direction sensors shall have traceable calibrations. Calibration certificates and reports shall contain all relevant traceability information. All reference standards used during the calibration of the wind direction sensor shall be stated within the test report of the calibration campaign;
- d) prior to every calibration campaign (when a batch of wind direction sensors is being calibrated) the integrity of the experimental set-up shall be verified by means of a comparative calibration of the calibration facility's "quality control wind direction sensor";
- e) flow quality measurements shall be carried out according to Clause N.3;
- f) the repeatability of the calibration shall be verified according to Clause N.3;
- g) wind direction sensor calibration shall be supported by a thorough assessment of calibration uncertainty, carried out in accordance with ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM 1995).

N.3 Requirements of the wind tunnel

The wind tunnel shall meet the requirements of Clause F.2.

The presence of the wind direction sensor shall not substantially affect the direction of the flow (field) in the wind tunnel. The presence of the wind direction sensor during its calibration may cause a flow diversion that is not encountered by the wind direction sensor when operated in the open field. To keep these effects at an acceptable level, the blockage ratio – defined as the ratio of the wind direction sensor frontal area with the fin oriented in line with the flow plus its mounting system to the total test section area – shall not exceed 0, for an open test section and 0,05 for a closed test section.

Special focus shall additionally be applied to verify that the horizontal direction of the wind tunnel flow is aligned parallel in relation to the test section centreline. The uniformity of the flow field (as required in Annex F) and the direction of flow shall be assessed prior to the calibration of the wind direction sensor. The flow direction shall be surveyed relative to the test section centreline at the representative location of the wind direction sensor by utilizing direction-sensitive flow measuring devices (i.e. two-hole conical yaw meter). The measured horizontal direction of flow shall be parallel to the test section centreline within 0,2°, the deviation shall be considered in the data evaluation.

The facility shall undergo a detailed examination of the repeatability of wind direction sensor calibrations. The facility shall designate at least one reference wind direction sensor for use in these tests. The reference wind direction sensor(s) shall be used only for checking performance of this and other wind direction sensor calibration facilities. The repeatability examination shall include at least 10 calibrations of the quality control wind direction sensor. The repeatability test shall not be conducted in succession. It is more representative if the calibrations are conducted over a longer time span. This will provoke a greater range of atmospheric conditions during the tests. The maximum difference between calibrations of the same reference sensor should be less than $0,5^\circ$ at 8 m/s wind speed throughout the measuring range of the wind direction sensor excluding the north band (wind vanes) where usually undefined conditions exist. This process shall be repeated after any modification or recalibration of the facility. The facility shall prove, through proficiency testing, that its results are comparable with other anemometer calibration facilities, according to ISO 17043.

The facility's average reference wind direction sensor calibration (as determined from repeatability tests described above) should agree with the average result of other calibration facilities within a deviation of the indicated equivalent flow direction of less than 1° throughout the measuring range, excluding the north band, at a wind speed of 8 m/s.

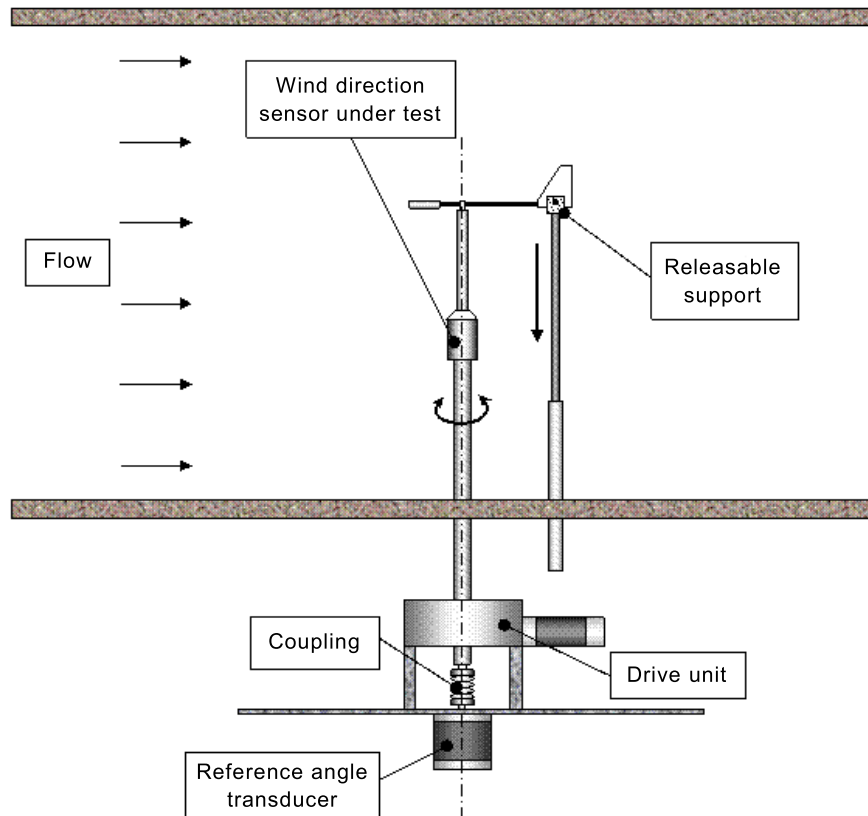
N.4 Instrumentation and calibration set-up requirements

Dedicated external signal conditioning equipment such as instrument amplifiers etc. shall be calibrated in isolation from the wind direction sensor, so that the wind direction sensor's calibration can be derived and reported in isolation from the signal conditioning equipment. The resolution of the data acquisition system used shall be at least 12 bits. Care shall also be exercised in the case of an analogue voltage instrument to ensure that the signal is adequately buffered to prevent its attenuation by low impedance logging equipment. Such effects are easily overlooked since 'believable' signals are still registered. The reference angle measurement system shall be the direct type (direct angle encoding, counting of increments, measuring proportional quantity such as magnetic, inductive or potentiometric methods). The shaft of the reference angle measurement system shall be connected to the shaft of the wind direction sensor rotation mechanism by means of a backlash-free coupling. The coupling shall be resistant to torsion and flexible to bending (flexion-elastic) in order to achieve the maximum possible elimination of assembly-influencing quantities (tolerances of concentricity and angles of both axes of rotation). The axes of rotation shall be oriented concentric and coaxial. The housing of the reference angle measurement system shall be securely fixed in a backlash-free manner. The reference angle measurement sensor shall be positioned in the tunnel as accurate as possible, and it may not disturb the wind direction sensor under test. The maximum deviation allowed is $0,1^\circ$. Figure N.1 illustrates an example of a calibration setup in a wind tunnel.

During calibration, the wind direction sensor shall be mounted on top of a tube in order to minimize flow distortion. This tube shall be of the same dimensions as the one on which the wind direction sensor will be mounted in service in the free atmosphere. It is important to ensure that the flow field around the wind direction sensor is not influenced by the presence of any reference wind speed measurement equipment. Conversely the presence of the wind direction sensor shall not affect the direction of the flow in a significant way.

The wind direction sensor shall be mounted at the test section perpendicular to the flow field of the wind tunnel as accurately as possible. The maximum deviation allowed is $0,2^\circ$. The fin shall also be aligned relative to the datum line/north mark and held there in position by an adjustable support until the calibration process begins. An accurate alignment of the wind direction sensor and its fin may be achieved by an appropriate device such as a mechanical jig or the employment of an optical instrument (i.e. 2D laser level). The wind direction sensor output signal shall be examined during calibration to ensure that it is not subject to interference or noise. The determination of the wind tunnel flow speed shall be in accordance with Annex F.

Great care shall be taken when aligning the wind direction sensor relative to the datum line (centreline) of the wind tunnel. The mechanical reference indicator (usually the north mark) of the wind direction sensor has to be properly aligned in relation to the datum line of the wind tunnel. It is not acceptable to perform the angular alignment of the wind direction sensor just by utilizing its electrical output signal. This would provoke an angular deviation between the external reference mark and the indicated value from the internal angular transducer of the wind direction sensor. This deviation would later be difficult to identify since the alignment of the vane at the meteorological mast is usually realized by means of the north mark. The proper angular alignment for the calibration shall be assured using an adequate method to measure the external reference mark.



IEC

Figure N.1 – Example of calibration setup of a wind direction sensor in a wind tunnel

N.5 Calibration procedure

Generally the wind direction sensor shall be directionally positioned by means of an adequate rotation mechanism (i.e. rotary table) while the direction and the speed of the flow remains unchanged. The output signal of the wind direction sensor is then assessed in relation to the reference angle measurement system installed at the rotation mechanism.

The procedure for the calibration of wind direction sensors is as follows:

The wind direction sensor is rotated at a constant yaw rate or stepwise. The indicated yaw angle (measured value of the wind direction sensor) is simultaneously recorded together with the reference yaw angle (measured value of the rotation mechanism). The selected rate of rotation is a compromise between adequate measurement precision and feasible measurement time. The recommended rate is 0,5 °/s. For a stepwise procedure, it is important to have an adequately fine increment of less than 3° in order not to miss erroneous direction data. The sampling frequency shall be high enough (usually 1 Hz or faster) to have a sampling bias within acceptable limits. The temperature of the wind direction sensor shall not vary significantly during its calibration to minimize an additional uncertainty due to

temperature-induced effects upon the indicated direction. A run in time of > 1 min shall be included to minimize temperature deviation between the wind direction sensor and the flow in the wind tunnel prior to the calibration run.

The calibration process shall consist of at least two complete yaw sweeps (including the north jump) for each of the above procedure. Each sweep shall be of opposite directions to account for possible hysteresis effects. There shall be an angular overlap of the data points of at least 10° at the beginning and the end of each sweep. A possible sequence may cover a clockwise sweep from –10° to 370° and a counter clockwise run from 370° to –10° for the subsequent sweep.

The calibration shall be performed at a constant wind speed of $(8 \pm 10 \%)$ m/s. The average wind speed should not vary throughout the duration of the wind direction sensor calibration.

N.6 Data analysis

Only the horizontal wind vector shall be considered during the wind direction sensor data assessment. The evaluation of the wind direction signal shall, for both wind vanes and sonic anemometers, be performed using the method of vector averaging as described in ISO 16622 [4] and 7.3.

All relevant data shall be evaluated as bin-averaged data. Data of the reference yaw sensor is hereby used as a basis to define the bin interval for the remaining data base. The bin-width shall have at least a resolution of 10°, centred at 5°, 15°...etc. of the yawing device. The bin-width shall be reduced to adequately assess the behaviour of certain sensor types (i.e. sonic anemometer) or to better represent sensor characteristics (i.e. excessive non-linearity).

N.7 Uncertainty analysis

It is important to identify the uncertainty of the horizontal flow direction measurement in conjunction with the wind direction sensor.

It is required that an uncertainty analysis shall be carried out in accordance with the ISO guide 98-3 to the expression of uncertainty comprising both category A and category B uncertainty. The magnitude of the net uncertainty shall be assessed statistically and shall account for:

- a) measurement uncertainty of the reference angle measuring system (reference angle transducer, coupling, mounting, electrical transducers, digital conversion, etc.);
- b) uncertainty of the flow direction sensed by the wind direction sensor, including an assessment of possible flow diversion due to the presence of the wind direction sensor;
- c) mounting uncertainty of the wind direction sensor (alignment of north mark and fin relative to the wind tunnel centreline);
- d) category A uncertainty due to short-term scatter (signal of wind direction sensor may vary over time due to unsteady flow conditions);
- e) category A uncertainty due to long-term scatter (scatter/drift of calibration results of the reference wind direction sensor over time for a number of calibrations);
- f) uncertainty when measuring the electrical signal of the wind direction sensor (electrical transducer, digital conversion, etc.).

N.8 Reporting format

The relevant documentation shall provide information on the procedure followed and the facility used for calibrating the wind direction sensor (test report on the calibration campaign) and on the individual wind direction sensor calibration (wind direction sensor calibration

report). The test report on the calibration facility setup shall contain the following information as a minimum:

- a) description of the wind tunnel (including test section, settling chamber, flow straighteners, fan arrangement);
- b) sketch of the wind tunnel showing the exact positions of the wind direction sensor and pitot tube(s) in the test section;
- c) flow quality measurements;
- d) turbulence measurements;
- e) instrumentation certificates;
- f) measurement procedure;
- g) data evaluation procedure;
- h) repeatability documentation of wind direction sensor calibration;
- i) uncertainty analysis;
- j) deviations from these requirements.

The calibration report of a wind direction sensor shall as a minimum contain the following information:

- a) make, type and serial number of the tested wind direction sensor and fin serial number if the item can be separated;
- b) tube diameter of the mounting system;
- c) make, type and serial number of external converters, if taken (i.e. frequency-to-voltage converters);
- d) name and address of the customer;
- e) signatures from the persons who carried out the calibration, checked the results and approved their issue;
- f) name of the wind tunnel;
- g) environmental conditions during calibration (air temperature, barometric air pressure and humidity);
- h) regression parameters (offset and slope), in tabular and graphical presentation of all calibration points;
- i) information of measured north dead-band width;
- j) The table shall contain the following information:
 - 1) bin number;
 - 2) average reference (flow) direction per bin;
 - 3) average indicated direction signal of the wind direction sensor per bin;
 - 4) uncertainty per bin;
 - 5) wind tunnel flow speed per bin.
- k) The graphical presentation shall include:
 - 1) indicated wind direction sensor signal as a function of reference yaw angle per bin;
 - 2) scatter plot of wind direction sensor signal vs. reference yaw angle if sweep is used;
 - 3) scatter plot of residuals of sensor signal vs. reference yaw angle;
 - 4) residuals per bin (deviation between indicated wind direction sensor signal and result of wind direction sensor calibration function);
 - 5) uncertainty associated with each measuring point.
- l) reference to the corresponding calibration campaign report and date of the calibration;
- m) photo showing the wind direction sensor and the mounting in the wind tunnel;

n) rate of angular velocity, data bin-width and number of acquired data points per bin.

N.9 Example of uncertainty calculation

N.9.1 General

The determination of the measurement uncertainty is based on the assumption that the following three main sources contribute to the total uncertainty:

- a) determination of flow direction in the wind tunnel (type B);
- b) uncertainty due to the wind direction sensor to be calibrated (wind vane, sonic anemometer) (category B);
- c) repeatability (category A).

In the following only category B uncertainties are considered. To determine the total uncertainty, the category A component shall be included as well.

N.9.2 Measurement uncertainties generated by determination of the flow direction in the wind tunnel

N.9.2.1 General

To evaluate the measurement uncertainty in the determination of the flow direction, the following individual uncertainties have to be considered:

N.9.2.2 Uncertainty contribution by uncertainties in the determination of the geometrical centreline α_{CL} (wind tunnel centreline)

Assuming that the centreline is defined with simple geometrical methods and the lines are accurate to 2 mm for a test section of 1,00 m by 2,00 m, the uncertainty of the geometrical centreline is $0,1^\circ$. Accepting a rectangular distribution, the contribution to the total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

N.9.2.3 Contribution by uncertainties in the determination of flow direction α_{dir}

Calibration of flow direction occurs by means of a wedge type probe. A well designed wind tunnel shows practically no deviation of the flow direction from the geometrical centreline of the wind tunnel. The contribution to uncertainty is deemed to be $0,1^\circ$. Accepting a rectangular distribution the contribution to the total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

N.9.2.4 Contribution by uncertainties in the calibration of the reference yawing sensor α_{sensor}

The reference angle is defined by using an electronic yawing sensor. Contribution to uncertainty resulting from the calibration of this sensor is assumed to be $0,35^\circ$. Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,2^\circ$.

N.9.2.5 Contribution by aligning the centreline with the north marking of the wind direction sensor α_{set}

Using a laser, the sensor (north marking, fin, wind tunnel centreline) can be aligned. Assuming that the laser beam has a maximum deviation of 1 mm from the centreline, the uncertainty contribution is less than $0,1^\circ$. A contribution to total uncertainty of $0,1^\circ$ is assumed. Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

N.9.2.6 Contribution due to influence of the angle between the axes of rotation

$\alpha_{\text{incl.1}}$

When mounting the reference unit on the turning drive, errors can occur in the angle between the rotary axes of the turning drive and the reference unit (inclination of the calibrated object relative to the calibration device inclination). The rotary axes do not align, but a coupling between the shafts of the reference and of the calibrated object compensates within certain limits for the effect of the position of the angle measurement planes. The angle error can be calculated using the following equation:

$$\delta\alpha_{\text{incl.1}} = 0,125 \cdot (2 \cdot p / r)^2 \cdot \sin\alpha \quad (\text{N.1})$$

where, according to VDI/VDE 2648, reference [5]:

α is the angle to be measured (calibration value);

p is the axial run-out deviation;

r is the effective radius of angle measurement.

With an assumed deviation of the levels of 1 mm and a radius of 50 mm for the yaw sensor, the extreme case of $\alpha = 90^\circ$ results in an uncertainty of $0,01^\circ$.

N.9.2.7 Contribution to uncertainty by potential eccentricity between wind direction sensor and reference unit α_{Exz}

By mounting the wind direction sensor on the turning drive of the reference unit, eccentricities can occur, referring to the parallel misalignment between the respective rotary axes. The rotary axes do not align. The angle error that may occur because of the parallel misalignment can be calculated using the following equation:

$$\delta\alpha_{\text{Exz}} = 2 \cdot (e / r) \cdot \sin(\alpha / 2) \quad (\text{N.2})$$

where, according to VDI/VDE 2648, reference [5]:

α is the angle to be measured (calibration value);

e is the eccentricity;

R is the effective radius of angle measurement.

Based on an assumed eccentricity of the rotary axes of 0,2 mm and a radius of 50 mm, the uncertainty of the extreme case of $\alpha = 180^\circ$ is $0,2^\circ$.

N.9.3 Contribution to measurement uncertainty by the wind direction sensor

N.9.3.1 General

Wind direction sensors may have different output signals. There are also digital sensors indicating directly the azimuth direction angle in degree. Usually the specimen is a wind direction sensor with an analogue output signal (current or voltage) or a potentiometric sensor.

N.9.3.2 Contribution to uncertainty by digital output signal α_{Digital}

Half of the digital resolution is assumed to contribute to the measurement uncertainty.

N.9.3.3 Contribution to measurement uncertainty by analogue output signal α_{Analog}

Sensors with an analogue signal (typically 10 V or 20 mA) are supposed to contribute to uncertainty with the resolution of the analogue-to-digital conversion. Assuming a measurement system with a resolution of 12 bit, the contribution to uncertainty is

$360^\circ/4 \cdot 0,96 = 0,1^\circ$. Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,06^\circ$.

N.9.3.4 Contribution to uncertainty by the determination of the ohmic resistance of a wind direction sensor α_Ω

The resistance of a potentiometric wind-vane can only be determined by means of a known voltage/current measurement. When determining the resistance of a potentiometric wind-vane (typically several k Ω) by means of indirect resistance measurement of voltage and constant current, the following uncertainties can occur:

- percent error of instrument shunt 0,030 %;
- error current through measurement system 0,020 %;
- resolution of analogue-to-digital conversion 0,025 %;
- assumed measurement uncertainty 0,05 % ~ 0,16 °.

Supposing a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,1^\circ$.

N.9.3.5 Contribution to uncertainty by mounting the wind direction sensor α_{item}

Typical wind direction sensors have a diameter of approximately 50 mm. The north marking often has a breadth of 1 mm and is therefore typically 2° . For the alignment of the north marking with a laser beam an uncertainty of 0,25 mm is assumed, thus resulting in a contribution to uncertainty of $0,25^\circ$. Assuming a rectangular distribution, the contribution to total standard uncertainty is $0,15^\circ$.

N.9.3.6 Contribution to uncertainty by possible malposition of the wind direction sensor $\alpha_{\text{Incl.2}}$

When mounting the wind direction sensor on the turning drive and the reference unit, angle errors in the alignment angle between the rotary axes can occur. The angle error is assumed to be $0,05^\circ$.

N.9.4 Result of the uncertainty calculation

To determine the total standard uncertainty, the following individual uncertainties have been considered (see Table N.1 and Table N.2):

Table N.1 – Uncertainty contributions in wind directions sensor calibration

Factor	Uncertainty category	Uncertainty distribution	Sensitivity coefficient	Measurement uncertainty	Standard deviation	Contribution to uncertainty	Unit
Reproducibility	A	1	1	-		0,1	°
Determination of geometrical centreline	B	2	1	0,1	$u_{CL} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CL$	0,06	°
Determination of flow direction	B	2	1	0,1	$u_{DIR} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot DIR$	0,06	°
Reference yaw sensor	B	1	1	0,35	$u_{REF} = \frac{1}{2} \cdot REF$	0,2	°
Inclination angle	B	2	1	0,01	$u_{Incl.1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot INCL.1$	0,01	°
Eccentricity	B	2	1	0,2	$u_{EXZ} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot EXZ1$	0,12	°
1 = normal distribution; 2 = rectangular distribution							

The calculation of the standard measurement uncertainty in the determination of the flow direction is carried out by means of quadratic accumulation:

$$u_{Flow\_dir} = (u_{CL}^2 + u_{DIR}^2 + u_{REF}^2 + u_{Incl.1}^2 + u_{EXZ1}^2)^{0,5} \quad (N.3)$$

$$u_{Flow\_dir} = (0,06^2 + 0,06^2 + 0,2^2 + 0,01^2 + 0,12^2)^{0,5} = 0,25^\circ \quad (N.4)$$

Table N.2 – Uncertainty contributions and total standard uncertainty in wind direction sensor calibration

Factor	Uncertainty category	Uncertainty distribution	Sensitivity coefficient	Measurement uncertainty	Standard deviation	Contribution to uncertainty	Unit
Digital output signal	B	2	1	half of digital resolution	$u_{\text{Digital}} = \frac{1}{2} \cdot \text{LSB}$	-	°
Or analogue output signal	B	2	1	0,1	$u_{\text{Analog}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{ANALOG}$	0,06	°
Or potentiometric sensor	B	1	1	0,2	$u_{\Omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Omega$	0,12	°
Mounting of sensor	B	1	1	0,25	$u_{\text{Mounting}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Mounting}$	0,15	°
Inclination angle	B	2	1	0,01	$u_{\text{INCL.2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{INCL.2}$	0,01	°
Eccentricity	B	2	1	0,2	$u_{\text{EXZ2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{EXZ2}$	0,12	°
1 = normal distribution; 2 = rectangular distribution							

The total standard uncertainty for e.g. a potentiometric wind vane is:

$$u_{\text{Total}} = (u_{\text{Flow\_dir}}^2 + u_{\Omega}^2 + u_{\text{Mounting}}^2 + u_{\text{Incl.2}}^2 + u_{\text{Exz2}}^2)^{0,5} \quad (\text{N.5})$$

$$u_{\text{Total}} = (0,25^2 + 0,12^2 + 0,15^2 + 0,01^2 + 0,12^2)^{0,5} = 0,34^{\circ} \quad (\text{N.6})$$

The contribution to total standard uncertainty by the individual uncertainty sources therefore result in a total standard uncertainty of 0,34 °for $k=1$ for a potentiometric wind vane. Usually this value is multiplied with the coverage factor $k=2$.

Annex O (informative)

Power performance testing in cold climate

O.1 General

Power performance testing at temperatures below 0 °C may be desirable for different reasons. For example, low temperatures may be frequent or there could be a need to determine the power performance degradation due to iced blades.

Annex O gives guidance on what is important to consider when carrying out power performance tests in cold climates and to provide recommendations.

O.2 Recommendations

O.2.1 General

It is recommended to use wind speed measurement sensors that are not susceptible to ice, such as heated cup anemometers, heated ultra-sonic anemometers, and remote sensing devices or to use suitable icing detectors to reliably monitor the presence of ice and filter the data accordingly.

Equipment for power performance testing in cold climate should include reliable icing detection. There are several possibilities to detect ice, including ice detectors for atmospheric icing, ice detectors for instrumental icing, visual observation or similar. Ice accretion occurs at temperatures below, or around zero. Power performance testing at temperatures far below 0 °C could therefore be performed without any significant difficulties, provided that suitable instruments and methods are used.

Ice accretion on supports and mounting structures can have a significant effect on the flow conditions for the anemometer. It is essential that such situations are avoided. A thorough assessment or monitoring of the conditions is required. It is recommended to use sufficiently heated structures in the vicinity of the instruments to prevent ice accretion.

O.2.2 Sonic anemometers

Sonic anemometers are allowed for power performance testing provided that suitable calibration procedures and classification procedures according to Annex F and in Annex I and Clause J.4 are adhered to.

Sonic anemometers that have sufficient heating capabilities may be used because they have no moving parts and are therefore suitable to be used in cold conditions.

O.2.3 Cup anemometers

The lower temperature limit for class A anemometers may be extended from 0 °C to –30 °C in the case of proper shaft (bearing) heating. This does not remove the need for ice detection.

Extension of the temperature range below the lower limit for the class can be carried out provided that sufficient evidence can be provided that the frictional effects can be assessed and accounted for.

The classification of the anemometer with an extended temperature range can be accomplished by extending the temperature range in Annex J provided that measurements of bearing friction cover the whole temperature range.

O.3 Uncertainties

Extended temperature range: Given by the class S.

O.4 Reporting

In addition to the normal reporting requirements, the precautions that have been adopted to ensure that the instruments that are used to measure the wind speed are not affected by ice and that low temperature effects on the measurement of the wind speed are accounted for.

The filtering for ice conditions should be individually documented. The results of the power performance test with and without the temperature extension taken into account shall be reported.

Annex P (informative)

Wind shear normalisation procedure

P.1 General

For deriving a climate specific power curve, the influence of the wind shear and wind veer on the power curve shall be accounted for by normalising the hub height wind speed to a pre-defined reference wind shear and wind veer. The reference wind shear and wind veer profile can have any shape and may be defined as function of the wind speed at hub height. The reference wind shear and wind veer could for instance reflect the conditions expected at the power curve test site if the purpose of the power curve test is to verify a warranted power curve that is specified for the same reference conditions. If not defined otherwise, a power law wind shear profile with shear exponent of 0,2 and a wind veer of 0° throughout the entire height range of the turbine rotor shall be applied.

The normalisation of the wind speed at hub height to the reference wind shear and wind veer shall be performed by means of the rotor equivalent wind speed concept. The kinetic energy in the wind across the rotor height range is:

$$P_{\text{kin}} = \int_A \frac{1}{2} \rho (V \cos(\varphi - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA \quad (\text{P.1})$$

and the rotor equivalent wind speed that corresponds to the kinetic energy is:

$$V_{\text{eq}} = \left(\frac{1}{A} \int_i (V_i \cos(\varphi_i - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA_i \right)^{1/3} \quad (\text{P.2})$$

The ratio of the rotor equivalent wind and the hub height wind speed characterises the shape of the wind shear profile and wind veer profile that is relevant for the description of the available kinetic energy at a certain wind speed at hub height. This ratio is called wind shear correction factor:

$$f_r = \frac{V_{\text{eq}}}{V_h} \quad (\text{P.3})$$

The same rotor equivalent wind speed can be reached by different combinations of hub height wind speeds and wind shear/veer conditions, e.g. by the wind shear/veer and hub height wind speed present within a 10-minute period at the power curve test as well as by the reference wind shear / veer and a corresponding hub height wind speed (here called normalised wind speed):

$$V_{\text{eq}} = f_{r,\text{measured}} \cdot V_{h,\text{measured}} = f_{r,\text{reference}} \cdot V_{h,\text{normalised}} \quad (\text{P.4})$$

Consequently, the wind shear/veer normalised hub height wind speed shall be calculated for each 10-minute period as:

$$V_{h,\text{normalised}} = \frac{V_{\text{eq}}}{f_{r,\text{reference}}} \quad (\text{P.5})$$

or as

$$V_{h,\text{normalised}} = \frac{f_{r,\text{measured}}}{f_{r,\text{reference}}} \cdot V_{h,\text{measured}} \quad (\text{P.6})$$

For a reference wind shear correction factor of 1 ($f_{r,\text{reference}} = 1$), i.e. in case of zero shear and veer, the normalised hub height wind speed equals the rotor equivalent wind speed. The uncertainty of the measurement of the wind shear and wind veer normalised wind speed shall be assessed according to Clause E.8, E.11.2.2 and E.11.2.3. It is pointed out that the rotor equivalent wind speed may overestimate the wind energy effectively usable by large wind turbines in case of the presence of high wind shear. Thus, a method uncertainty of one third of the correction of the hub height wind speed shall be applied as additional uncertainty to the uncertainty of the measurement of the wind shear and wind veer normalised wind speed.

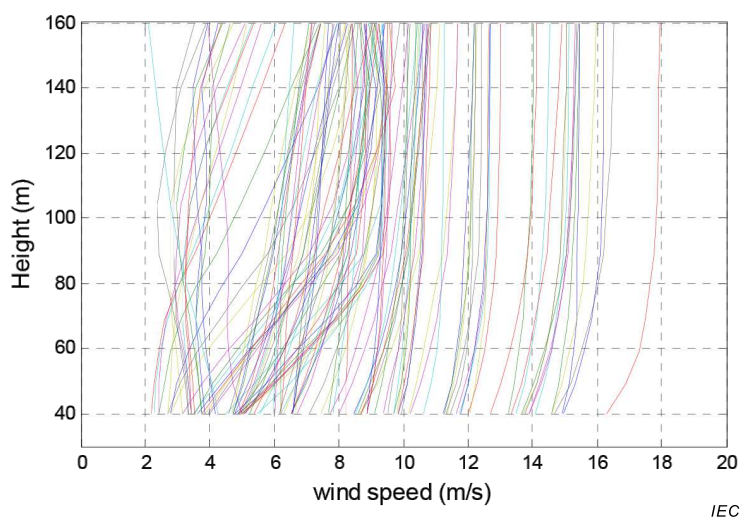
Under certain conditions, the evaluation of the wind shear and wind veer over the height range of the turbine rotor may not be possible, because no measurements of the wind speed or wind direction over the height range of the turbine rotor are available or because a site calibration of the wind speed and wind direction at other heights than hub height is not possible. In this case, the lack of the integration of the wind shear/veer in the power curve evaluation shall be accounted for according to E.11.2.2.2 and E.11.2.3.2 for the desired reference wind shear/veer conditions. In addition, a method uncertainty of one third of a virtual wind speed correction from the assumed wind shear/veer conditions at the power curve test to the desired reference wind shear/veer conditions shall be taken into account.

Annex Q (informative)

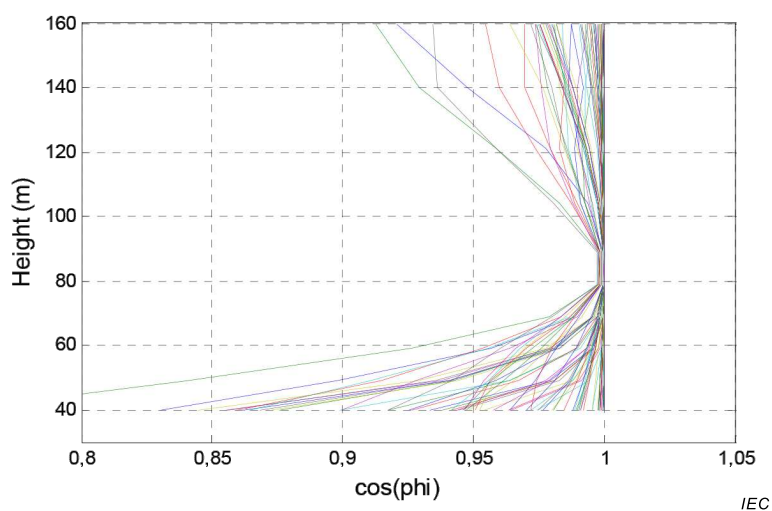
Definition of the rotor equivalent wind speed under consideration of wind veer

Q.1 General

The wind speed at hub height is not always representative of the wind over the whole rotor. Large wind speed and direction variations may be present as a result of either the atmospheric stability and/or terrain influence. Figure Q.1 shows LIDAR wind profiles over flat terrain as well as the cosine of wind direction changes relative to an assumed hub height. It is seen that the wind speed component perpendicular to the wind turbine rotor at a specific height will occasionally be much less than the wind speed at the specific height.



a) Lidar wind profiles



b) Cosine of wind direction variation angle relative to a height

Figure Q.1 – Wind profiles measured with LIDAR over flat terrain

Therefore, the energy yield through the wind turbine rotor will depend on both the wind shear and wind veer of the specific profile. Using the power curve based on the wind speed at hub height ignores both wind shear and wind veer. The power curve obtained with the rotor equivalent wind speed depends less on the wind shear and wind veer than the power curve obtained with the wind speed at hub height.

Q.2 Definition of rotor equivalent wind speed under consideration of wind veer

The rotor equivalent wind speed is the wind speed corresponding to the kinetic energy flux through the swept rotor area, when accounting for the wind shear and wind veer. For the case that at least three measurement heights are available (see 7.2.6) the rotor equivalent wind speed is defined as

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n (v_i \cos(\varphi_i))^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad (Q.1)$$

where

- n is the number of available measurement heights ($n \geq 3$);
- v_i is the wind speed measured at height i ;
- φ_i is the angle difference between the wind direction at hub height and segment i ;
- A is the area swept by the rotor (i.e. πR^2 with radius R);
- A_i is the area of the i^{th} segment, i.e. the segment the wind speed v_i represents (refer to 9.1.3.2, Equation (6)).

Q.3 Measurement of wind veer

The rotor equivalent wind speed as defined in Equation (Q.1) is influenced by the difference of wind direction measurements at various heights relative to hub height. In order to provide accurate measurements of the difference of wind directions, it is important to measure the wind directions at the different height levels with the same type of sensor, i.e. one remote sensing device measuring all heights, or same sensors on the meteorological mast at all heights.

Q.4 Combined wind shear and wind veer normalisation

The procedures described in Annex P may be extended to referencing back the measured power curve to reference wind veer conditions by considering also a reference wind veer profile in addition to a reference wind shear profile. The integration of the reference profiles over the rotor area shall be done according to Equation (Q.1).

Annex R (informative)

Uncertainty considerations for tests on multiple turbines

R.1 General

Annex R addresses the uncertainty considerations that arise when compiling test results from multiple turbines. When testing multiple turbines, the quantities of interest are typically the mean *AEP* of the sample and the uncertainty in that mean. The mean *AEP* can most simply be determined by taking a simple average of the individual turbine *AEP*s.

The determination of the uncertainty in the average *AEP* is not as straightforward. As this is a frequently encountered situations, this standard provides an informative approach as to how this uncertainty may be estimated. The mathematical framework for this approach is exactly the same as explained in IEC 61400-12-2:2013 Annex I and J and will not be repeated here. What is different for this standard is Table R.1 of estimated correlations between tests on different turbines and the results as represented in Figures J.1 and J.2 of IEC 61400-12-2:2013, which will be repeated here. As an introduction, a short discussion of the problem at hand will be repeated.

One approach to combining uncertainties is a simple average of the individual test uncertainties. However, the simple average fails to account for the chief benefit of multiple tests, i.e. a reduction in the combined test uncertainty. A second approach is to calculate the standard uncertainty of the mean of the uncertainties:

$$u_{AEP_{AVG}} = \frac{1}{L} \sqrt{\sum_{i=1}^L u_{AEP,i}^2} \quad (R.1)$$

where

$u_{AEP_{AVG}}$ ⁴³ is the uncertainty in the average *AEP*;

$u_{AEP,i}$ is the uncertainty in *AEP* for turbine *i*;

L is the number of turbines tested.

Equation (R.1) assumes full independence among the individual turbine test results, meaning there is no correlation in the individual test results from one unit to the next. As a consequence application of Equation (R.1) would lead to an underestimation of the uncertainty in the average *AEP*. Therefore, in order to accurately assess the uncertainty in the average *AEP*, it is necessary to identify a practical method for handling correlated uncertainty components. An approach is suggested based on the ISO information publication '*Guide to the expression of uncertainty in measurement*' with minor adjustments in the handling of correlation.

⁴³ Please note that the equation here is slightly different from the equation in IEC 61400-12-2. As this is the uncertainty of an average and division by $1/L$ is a linear transformation, we get a $1/L^2$ under the square root or a $1/L$ in front of the square root.

Table R.1 – List of correlated uncertainty components

Measured parameter	Source	Correlation coefficient	Condition	Value range	Notes
Electric power	Current transformers	$\rho_{up1,m,n}$	Same instrument make Different instrument make	0,9 0,1	C_{TS} of the same make tend to have similar cat B error values relative to the true value.
	Voltage transformers	$\rho_{up2,m,n}$	Same instrument make Different instrument make	0,9 0,1	V_{TS} of the same make tend to have similar cat B error. Direct measurement of voltage eliminates this uncertainty.
	Power transducer or power measurement device	$\rho_{up3,m,n}$	Same instrument make Different instrument make	0,9 0,1	Power measurement devices of the same make tend to have similar cat B error.
	Dynamic power measurement	$\rho_{up4,m,n}$	Same instrument make Different instrument make	0,9 0,1	Power measurement devices of the same make tend to have similar cat B error.
	Data acquisition	$\rho_{udp,m,n}$	Same instrument make Different instrument make	0,9 0,1	Data acquisition devices of the same make tend to have similar cat B errors relative to the true value.
Wind speed	Anemometer calibration	$\rho_{uv1,m,n}$	Shared instrument (same met mast) Different masts, same make/model, same calibration lab Different masts, different make/model, same calibration lab Different masts, same make/model, different calibration labs Different masts, different make/model, different calibration labs	1,0 0,9 0,7 0,4 0,1	Calibration reference and method produces similar cat B error.
	PostCal / In-situ cal	$\rho_{uv2,m,n}$	Shared instrument (same met mast) Same instrument make Different instrument make	1,0 0,9 0,7	Anemometers of the same make tend to have similar cat B errors relative to the true value.
	Operational uncertainty	$\rho_{uv3,m,n}$	Shared Instrument (same masts) Same instrument make Different instrument make	1,0 0,9 0,8	Anemometers of the same make tend to have similar cat B errors relative to the true value.
	Mounting effects	$\rho_{uv4,m,n}$	Per specification in this standard	0,9	Similar mounting required for use of a given transfer function drives a correlated uncertainty.
	DAQ	$\rho_{uv5,m,n}$	Shared DAQ Different DAQ of same make, same design Different DAQ of different make, same design Different DAQ of same make, different design Different DAQ of different make, different design	1,0 0,9 0,7 0,5 0,2	DAQ will be correlated the more similar the setup is.

Measured parameter	Source	Correlation coefficient	Condition	Value range	Notes
	Flow distortion due to terrain without site cal	$\rho_{uv6,m,n}$	Both turbines 2D to 3D (or 3D to 4D) from met mast One turbine 2D to 3D and one turbine 3D to 4D	0,9 0,6	Increased terrain complexity and variation in terrain amongst test units will tend to have dis-similar cat B errors on the wind speed relative to the true value, distance plays an important role.
	Flow distortion due to terrain amongst test units with site cal, anemometer calibration	$\rho_{uv7,m,n}$	Shared instrument (same met mast) Different masts, same make/model, same calibration lab Different masts, different make/model, same calibration lab Different masts, same make/model, different calibration labs Different masts, different make/model, different calibration labs	1,0 0,9 0,7 0,4 0,1	
	Flow distortion due to terrain amongst test units with site cal, operational uncertainty	$\rho_{uv7,m,n}$	Shared instruments (same masts) Different masts, same make/model) Different masts, different make/model	1,0 0,9 0,7	
	Data acquisition for site calibration	$\rho_{udv,m,n}$	Shared DAQ Different DAQ of same make, same design Different DAQ of different make, same design Different DAQ of same make, different design Different DAQ of different make, different design	1,0 0,9 0,7 0,5 0,2	Data acquisition devices of the same make tend to have similar cat B error.
Temperature	Temperature sensor	$\rho_{ut1,m,n}$	Shared instruments(same met mast) Same instrument make Different instrument make	1,0 0,9 0,1	Temperature measurement devices of the same make tend to have similar cat B error.
	Radiation shielding	$\rho_{ut2,m,n}$	Shared instruments(same met mast) Same instrument make Different instrument make	1,0 0,9 0,6	Radiation shields tend to have the same method errors relative to the true value.
	Mounting effects	$\rho_{ut3,m,n}$	Shared instruments(same met mast) Same location and mounting Different location or mounting	1,0 0,9 0,1	
	Data acquisition	$\rho_{udt,m,n}$	Shared instruments(same met mast) Same instrument make Different instrument make	0,9 0,1	Data acquisition devices of the same make tend to have similar cat B error.

Measured parameter	Source	Correlation coefficient	Condition	Value range	Notes
Pressure	Pressure sensor	$\rho_{ub1,m,n}$	Shared instrument (same met mast)	1,0	Pressure measurement devices of the same make tend to have similar cat B error.
			Same instrument make	0,9	
			Different instrument make	0,1	
	Mounting effects	$\rho_{ub2,m,n}$	Shared instrument (same met mast)	1,0	If using multiple instruments, mounting will likely be similar.
			Same instrument make	0,9	
			Different instrument make	0,1	
	Data acquisition	$\rho_{udb,m,n}$	Shared instrument (same met mast)	1,0	Data acquisition devices of the same make tend to have similar cat B error.
			Same instrument make	0,9	
			Different instrument make	0,1	
Method	Air density correction	$\rho_{um1,m,n}$	Same correction methodology for all turbines	1,0	
	Wind Conditions	$\rho_{um2,m,n}$	Same conditions for different turbines	1,0	
	Seasonal variation	$\rho_{um3,m,n}$	Testing occurs during the same time of year	1,0	
			Testing occurs during different time of year	0,6	
	Statistical	Variance in electrical power	$\rho_{sp,m,n}$		0,0

Annex S (informative)

Mast flow distortion correction for lattice masts

Annex S gives guidance regarding a possible method to determine a correction for flow distortion of side mounted anemometers. Such a correction is already discussed in 7.2.4 as well as 9.1.2. In this annex, a more detailed approach is presented for a lattice mast.

A similar method may work for other types of mast configuration but it is likely that specific changes need to be made to allow for the differences in the configuration. Other methods to determine a correction may be applied but shall be documented in sufficient detail to allow the results to be reproduced by a third party based on the reported information.

The starting point is to do a linear regression between two anemometers installed on different booms at the same measurement height. The residuals of the regression can be determined and plotted against wind direction for the full 0° to 360° sector. Other filters may be applied to ensure data quality. This plot will normally show two things:

- a) for specific directions large flow distortions will be visible, indicated wakes operation from mast, guy wires or other sensors;
- b) a slowly changing sine wave is normally visible with a period of 360°.

An example is given in Figure S.1 below. This example is for a goal-post design for the top of the mast but it illustrates the expected signal behaviour. As shown in the graph, it may be beneficial to also plot the expected wakes as determined from the geometric set-up as this will help to correctly interpret the plot. Care should be taken when there are too many and/or too strong wakes, from masts, guys and other sensors as the wakes may overshadow the sine-wave we are interested in and thereby make this method impractical or impossible to apply.

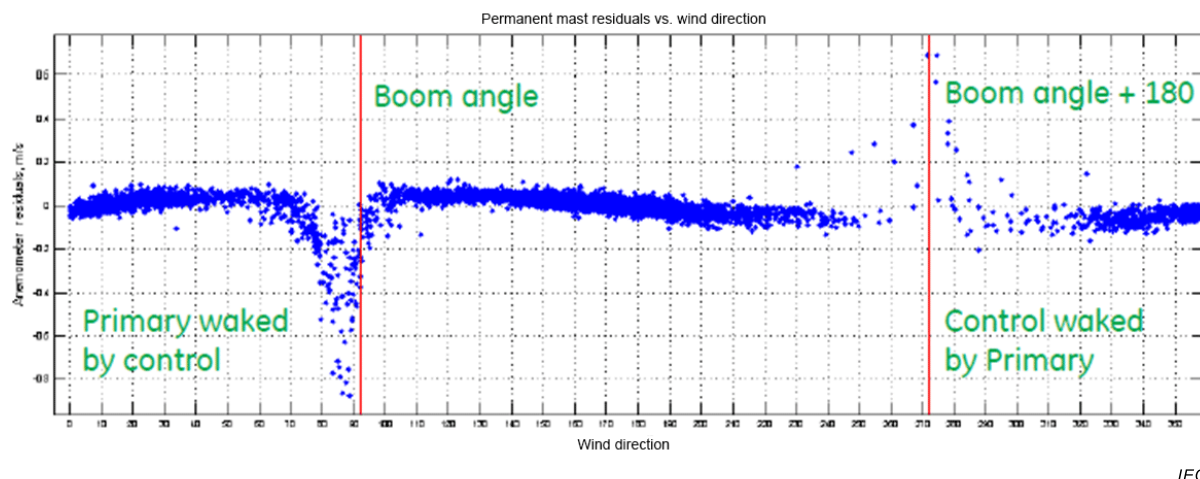


Figure S.1 – Example of mast flow distortion

The sine wave is the flow distortion from the mast and other hardware at the same measurement height that we aim at correcting. This is done by finding suitable values for the parameters in this equation:

$$V_1 = m \cdot V_2 + B + A \sin(WD + Centre) \quad (S.1)$$

where

- V_1 is the wind speed from sensor one;
- V_2 is the wind speed from the second sensor;
- m is the slope of the regression between V_1 and V_2 ;
- B is the offset of the regression between V_1 and V_2 ;
- A is a scaling parameter;
- WD is the wind direction.

Centre is the wind direction where the residuals are expected to be zero; In the above examples where the boom angles are 92° and 272°, *Centre* = 182°. Figure G.3, Figure G.6 and Figure G.8 may be useful in assessing the directions where flow distortion is equal at both sensor locations. Solutions within the measurement sector (or closest to) are most useful.

A is a scaling parameter that we need to solve for. A can be found by iteration; by first setting A to zero and picking another point in the data (keeping away from the wakes data), we can determine the current value for the residuals. In the graph above we see a residual value of 0,03 at 150° and a residual value of 0 at 182°. Now we define *Centre* = 182° and require a value of zero for V_1 at 150°. This determines value for A of 0,06 (note the negative sign for the sine at an angle of 150°+180° = 330°). Further checking of other points is recommended to make sure we have the right value for A and that this is not based on accidental outlier data.

A reflects the magnitude of the sum effect of the flow distortion on both anemometers. Therefore, each anemometer wind speed must be corrected by half of amplitude A according to Equations (S.2) and (S.3) below:

$$V_{1\text{corr}} = V_1 + \frac{A}{2} \sin(\text{WD} + \text{Centre}) \quad (\text{S.2})$$

$$V_{2\text{corr}} = V_2 - \frac{A}{2} \sin(\text{WD} + \text{Centre}) \quad (\text{S.3})$$

The flow distortion correction shown here does not correct to zero flow distortion but only normalizes to the direction where the flow distortion effect is the same at both anemometers. The direction at which the flow distortion is zero may be estimated from the flow speed graphs in Clause G.4, and the final flow correction can be adjusted accordingly.

The corrected wind speeds can now be used to recalculate residuals, which can be plotted in the same graph to show the improvement. The residuals of the corrected signal (in red) are clearly less depending on wind direction than the original (in blue), as shown in Figure S.2.

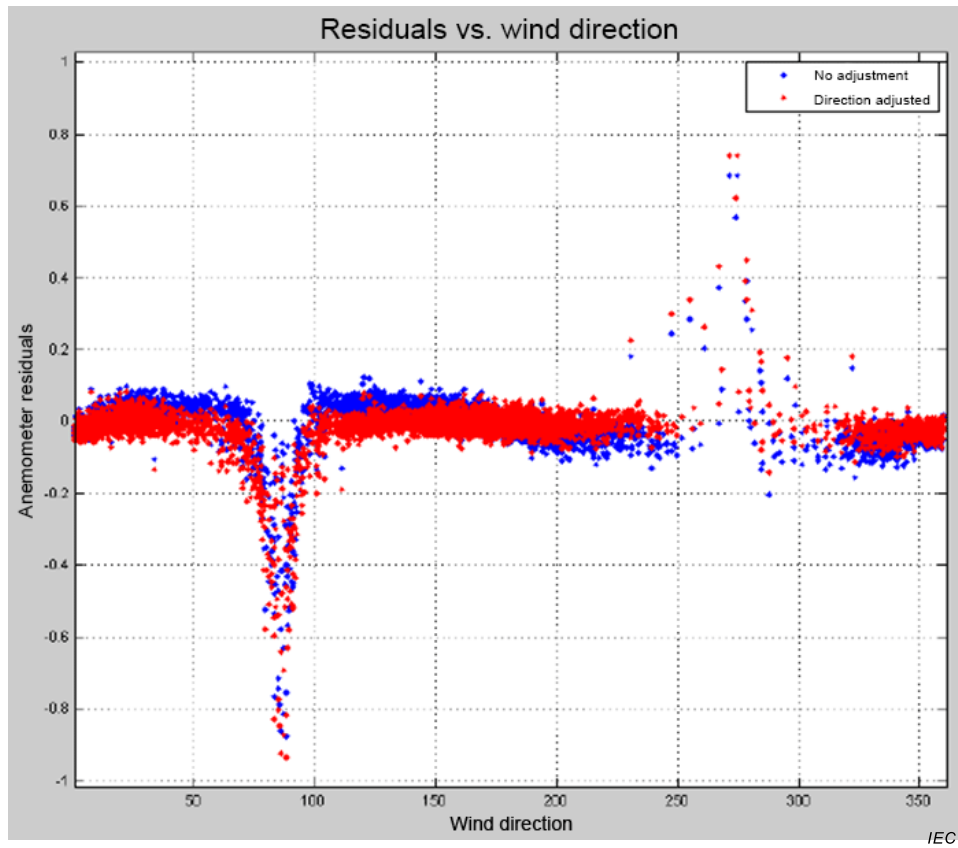


Figure S.2 – Flow distortion residuals versus direction

Bibliography

- [1] IEC 61400-1:2005, *Wind turbines – Part 1: Design requirements*
IEC 61400-1:2005/AMD1:2010
IEC 61400-1:2005/AMD1:2010
 - [2] IEC 61400-2:2013, *Wind turbines – Part 2: Small wind turbines*
 - [3] IEC 61400-12-2, *Wind turbines – Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry*
 - [4] ISO 16622, *Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for mean wind measurements*
 - [5] VDI/VDE 2648, *Transducers and measuring systems for measurement of angle*
 - [6] JCGM 200:2012, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3rd edition
 - [7] ACCUWIND – *Methods for classification of cup anemometers*, J-Å DAHLBERG, T.F. PEDERSEN, P. BUSCHE, Risø-R-1555 (EN), May 2006
 - [8] ACCUWIND – *Classification of five cup anemometers according to IEC61400-12-1*, T.F. PEDERSEN, J-Å DAHLBERG, P. BUSCHE, Risø-R-1556 (EN), May 2006
 - [9] *Quantification of linear torque characteristics of cup anemometers with step responses*, T.F. PEDERSEN, Risø-I-3131 (EN), February 2011
 - [10] *Wind shear proportional errors in the horizontal wind speed send by focused range gated lidars*, LINDELOW et al., IOP conf. Series: Earth and Env. Sc., Vol. 1, 2008
 - [11] *Modelling conically scanning lidar error in complex terrain with WAsP engineering*, BINGÖL, F., MANN, J., and FOUSSEKIS, D., Riso-R-1664(EN), 2008
 - [12] *How to Gain Acceptance for Lidar Measurements*, ALBERS, A., JANSSEN, A.W., Mander, J., Proceedings of German Wind Energy Conference, 2010
 - [13] *Turbulence and Shear Normalisation of Wind Turbine Power Curve*, ALBERS, A., Proceedings of European Wind Energy Conference, 2010
 - [14] *Turbulence Normalisation of Wind Turbine Power Curve Measurements*, ALBERS, A., Report PP09037, Deutsche WindGuard
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	275
INTRODUCTION	278
1 Domaine d'application	280
2 Références normatives	280
3 Termes et définitions	281
4 Symboles et unités	284
5 Vue d'ensemble de la méthode de performance de puissance	288
6 Préparation de l'essai de performance	293
6.1 Généralités	293
6.2 Eolienne et raccordement électrique	293
6.3 Site d'essai	293
6.3.1 Généralités	293
6.3.2 Emplacement du matériel de mesure du vent	293
6.3.3 Secteur de mesure	294
6.3.4 Facteurs de correction et incertitude due à la distorsion de l'écoulement résultant de la topographie	295
7 Matériel d'essai	295
7.1 Puissance électrique	295
7.2 Vitesse du vent	295
7.2.1 Généralités	295
7.2.2 Exigences générales concernant les anémomètres montés en tête de mât météorologique	296
7.2.3 Anémomètres montés en tête de mât	297
7.2.4 Anémomètres montés latéralement	297
7.2.5 Dispositif de télédétection (RSD)	298
7.2.6 Mesure de la vitesse du vent équivalente du rotor	298
7.2.7 Mesure de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu	299
7.2.8 Mesures du cisaillement du vent	299
7.3 Direction du vent	301
7.4 Masse volumique de l'air	301
7.5 Vitesse de rotation et angle de pas	302
7.6 Condition des pales	302
7.7 Système de contrôle de l'éolienne	302
7.8 Système d'acquisition de données	302
8 Procédure de mesure	302
8.1 Généralités	302
8.2 Exploitation de l'éolienne	303
8.3 Collecte des données	303
8.4 Rejet des données	303
8.5 Base de données	304
9 Résultats déduits	305
9.1 Normalisation des données	305
9.1.1 Généralités	305
9.1.2 Correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique par les anémomètres montés latéralement	305

9.1.3	Correction du cisaillement du vent (lorsque des mesures de REWS sont disponibles)	306
9.1.4	Correction de la déviation de la trajectoire du vent	308
9.1.5	Normalisation de la masse volumique de l'air	308
9.1.6	Normalisation des turbulences	309
9.2	Détermination de la courbe de puissance mesurée	310
9.3	Production annuelle d'énergie (<i>AEP</i>)	310
9.4	Coefficient de puissance	312
10	Format de rapport	313
Annexe A (normative) Evaluation des influences des éoliennes et des obstacles présents sur le site d'essai		
A.1	Généralités	321
A.2	Exigences relatives aux éoliennes voisines en exploitation	321
A.3	Exigences pour les obstacles	322
A.4	Méthode de calcul des secteurs à exclure	323
A.5	Exigences spéciales relatives aux obstacles étendus	326
Annexe B (normative) Evaluation du terrain sur le site d'essai		
Annexe C (normative) Procédure d'étalonnage du site		
C.1	Généralités	330
C.2	Vue d'ensemble de la procédure	331
C.3	Montage d'essai	333
C.3.1	Considérations relatives au choix de l'éolienne à l'essai et de l'emplacement du mât météorologique	333
C.3.2	Instrumentation	335
C.4	Acquisition de données et critères de rejet	336
C.5	Analyse	337
C.5.1	Evaluation des conditions de cisaillement du site	337
C.5.2	Méthode 1: tranches de direction du vent et tranches de cisaillement du vent	339
C.5.3	Méthode 2: méthode de régression linéaire lorsque le cisaillement n'a pas une influence significative	340
C.5.4	Calculs supplémentaires	341
C.6	Incertitude d'étalonnage du site	342
C.6.1	Incertitude d'étalonnage du site de catégorie A	342
C.6.2	Incertitude d'étalonnage du site de catégorie B	344
C.6.3	Incertitude composée	344
C.7	Contrôles de la qualité et incertitudes supplémentaires	345
C.7.1	Contrôle de la convergence	345
C.7.2	Contrôle de corrélation pour la régression linéaire (voir C.5.3)	345
C.7.3	Variation de correction entre des tranches de direction du vent adjacentes	345
C.7.4	Suppression du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance	346
C.7.5	Etalonnage du site et mesures de performance de puissance lors de différentes saisons	347
C.8	Vérification des résultats	347
C.9	Exemples d'étalonnage du site	349
C.9.1	Exemple A	349
C.9.2	Exemple B	355
C.9.3	Exemple C	365

Annexe D (normative) Evaluation de l'incertitude de mesure	368
Annexe E (informative) Fondements théoriques de la détermination de l'incertitude de mesure à l'aide de la méthode des tranches	371
E.1 Généralités	371
E.2 Composition des incertitudes	371
E.2.1 Généralités	371
E.2.2 Incertitude élargie	373
E.2.3 Fondements de l'évaluation de l'incertitude	374
E.3 Incertitudes de catégorie A	378
E.3.1 Généralités	378
E.3.2 Incertitude de catégorie A sur la puissance électrique	378
E.3.3 Incertitudes de catégorie A sur l'étalonnage du site	379
E.4 Incertitudes de catégorie B: Introduction et système d'acquisition de données	379
E.4.1 Incertitudes de catégorie B: Introduction	379
E.4.2 Incertitudes de catégorie B: Système d'acquisition de données	379
E.5 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie	380
E.5.1 Généralités	380
E.5.2 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Transformateurs de courant	380
E.5.3 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Transformateurs de tension	381
E.5.4 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Transducteur de puissance ou autre dispositif de mesure de puissance	381
E.5.5 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Acquisition de données	382
E.6 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Introduction et capteurs	382
E.6.1 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Introduction	382
E.6.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Matériel	382
E.6.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique	383
E.7 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD	386
E.7.1 Généralités	386
E.7.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Etalonnage	386
E.7.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Contrôle in situ	386
E.7.4 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Classification	387
E.7.5 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Montage	388
E.7.6 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Variation d'écoulement	388
E.7.7 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Essai de surveillance	389
E.8 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – REWS	390
E.8.1 Généralités	390
E.8.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – REWS – Mesure de la vitesse du vent sur l'ensemble du rotor	390
E.8.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – REWS – Déviation de la trajectoire du vent	392
E.9 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain	392
E.9.1 Généralités	392
E.9.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Pré-étalonnage	393

E.9.3	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Post-étalonnage	393
E.9.4	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Classification.....	393
E.9.5	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Montage	394
E.9.6	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs – Paratonnerre	395
E.9.7	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Acquisition de données	395
E.9.8	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Variation de correction entre tranches adjacentes	395
E.9.9	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Enlèvement du capteur de direction du vent	396
E.9.10	Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Variation saisonnière	396
E.10	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air	396
E.10.1	Généralités	396
E.10.2	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Introduction – Température	397
E.10.3	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Etalonnage	398
E.10.4	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Protection contre le rayonnement	398
E.10.5	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Montage	398
E.10.6	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Acquisition de données	398
E.10.7	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Introduction	398
E.10.8	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Etalonnage	399
E.10.9	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Montage	399
E.10.10	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Acquisition de données	400
E.10.11	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Introduction	400
E.10.12	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Etalonnage	401
E.10.13	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Montage	401
E.10.14	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Acquisition de données	401
E.10.15	Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Correction	401
E.11	Incertitudes de catégorie B: Méthode	402
E.11.1	Généralités	402
E.11.2	Incertitudes de catégorie B: Méthode – Conditions de vent	402
E.11.3	Incertitudes de catégorie B: Méthode – Variations saisonnières	408
E.11.4	Incertitudes de catégorie B: Méthode – Normalisation des turbulences (ou absence de connaissances)	408
E.11.5	Incertitudes de catégorie B: Méthode – Climat froid	409
E.12	Incertitudes de catégorie B: Direction du vent	409
E.12.1	Généralités	409
E.12.2	Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons	410

E.12.3	Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD.....	411
E.13	Composition des incertitudes	412
E.13.1	Généralités.....	412
E.13.2	Composition des incertitudes de catégorie B relatives à la puissance électrique ($u_{P,i}$)	412
E.13.3	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent ($u_{V,i}$).....	413
E.13.4	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent par un anémomètre à coupelles ou à ultrasons ($u_{VS,i}$)	413
E.13.5	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent par un RSD ($u_{VR,i}$).....	414
E.13.6	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS $u_{REWS,i}$	414
E.13.7	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS pour un mât météorologique significativement au-dessus de la hauteur du moyeu ou un RSD avec un mât météorologique en dessous de la hauteur du moyeu	415
E.13.8	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS pour un mât météorologique à la hauteur du moyeu + un RSD pour la mesure du cisaillement avec une vitesse du vent absolue.....	417
E.13.9	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS pour un mât météorologique à la hauteur du moyeu + un RSD pour la mesure du cisaillement avec une vitesse du vent relative	419
E.13.10	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS en raison de la déviation de la trajectoire du vent sur l'ensemble du rotor $u_{REWS,veer,i}$	420
E.13.11	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent en raison de la distorsion de l'écoulement due à l'étalonnage du site $u_{VT,i}$	425
E.13.12	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la température $u_{T,i}$	425
E.13.13	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la pression $u_{B,i}$	426
E.13.14	Composition des incertitudes pour la mesure de l'humidité $u_{RH,i}$	427
E.13.15	Composition des incertitudes pour les composantes relatives à la méthode $u_{M,i}$	427
E.13.16	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la direction du vent par une girouette ou un anémomètre à ultrasons $u_{WV,i}$	428
E.13.17	Composition des incertitudes relatives à la mesure de la direction du vent par un RSD $u_{WR,i}$	428
E.13.18	Incertitudes de catégorie B composées	428
E.13.19	Incertitude-type composée – Courbe de puissance	429
E.13.20	Incertitude-type composée – Production d'énergie	429
E.14	Pertinence des composantes d'incertitude dans les conditions spécifiées	429
E.15	Tableaux de référence	430
Annexe F (normative)	Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les anémomètres	434
F.1	Exigences générales.....	434
F.2	Exigences pour la soufflerie	434
F.3	Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage	436
F.4	Procédure d'étalonnage	437
F.4.1	Procédure générale pour les anémomètres à coupelles et à ultrasons	437
F.4.2	Procédure d'étalonnage des anémomètres à ultrasons	437

F.4.3	Détermination de la vitesse du vent à l'emplacement de l'anémomètre	437
F.5	Analyse des données	439
F.6	Analyse d'incertitude	439
F.7	Format de rapport	439
F.8	Exemple de calcul d'incertitude	440
Annexe G (normative)	Montage des instruments sur le mât météorologique	444
G.1	Généralités	444
G.2	Un seul anémomètre monté en tête de mât	444
G.3	Anémomètres montés côte à côte en tête de mât	447
G.4	Instruments montés latéralement	449
G.4.1	Généralités	449
G.4.2	Mâts météorologiques tubulaires	450
G.4.3	Mâts météorologiques en treillis	451
G.5	Protection contre la foudre	457
G.6	Montage d'autres instruments météorologiques	457
Annexe H (normative)	Essai de performance de puissance sur les petites éoliennes	458
H.1	Généralités	458
H.2	Définitions	458
H.3	Définition et installation d'un système éolien	458
H.4	Emplacement du mât météorologique	459
H.5	Matériel d'essai	460
H.6	Procédure de mesure	461
H.7	Résultats déduits	461
H.8	Rapports	462
H.9	Annexe A – Evaluation de l'influence des éoliennes et des obstacles sur le site d'essai	462
H.10	Annexe B – Evaluation du terrain sur le site d'essai	462
H.11	Annexe C – Procédure d'étalonnage du site	463
Annexe I (normative)	Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons	464
I.1	Généralités	464
I.2	Classes de classification	464
I.3	Plages des paramètres d'influence	465
I.4	Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons	465
I.5	Format de rapport	467
Annexe J (normative)	Evaluation des anémomètres à coupelles et à ultrasons	468
J.1	Généralités	468
J.2	Mesures des caractéristiques des anémomètres	468
J.2.1	Mesures des caractéristiques de réponse de l'angle d'inclinaison des anémomètres à coupelles dans une soufflerie	468
J.2.2	Mesures des caractéristiques directionnelles des anémomètres à coupelles dans une soufflerie	470
J.2.3	Mesures des caractéristiques de couple du rotor de l'anémomètre à coupelles dans une soufflerie	470
J.2.4	Mesures des réponses échelonnées des anémomètres à coupelles dans une soufflerie	471
J.2.5	Mesures des effets induits de la température sur la performance de l'anémomètre	472
J.2.6	Mesures des caractéristiques directionnelles des anémomètres à ultrasons dans une soufflerie	474

J.3	Méthode de classification des anémomètres à coupelles basée sur les essais en soufflerie et en laboratoire et sur la modélisation de l'anémomètre à coupelles	474
J.3.1	Méthode	474
J.3.2	Exemple de modèle d'anémomètre à coupelles.....	474
J.4	Méthode de classification d'anémomètre à ultrasons basée sur les essais en soufflerie et sur la modélisation de l'anémomètre à ultrasons.....	483
J.5	Mesures de comparaison sur site libre	483
Annexe K (normative)	Comparaison in situ des anémomètres	484
K.1	Généralités	484
K.2	Conditions préalables	484
K.3	Méthode d'analyse	484
K.4	Critères d'évaluation	486
Annexe L (normative)	Application de la technologie de télédétection	489
L.1	Généralités	489
L.2	Classification des dispositifs de télédétection	490
L.2.1	Généralités.....	490
L.2.2	Acquisition de données.....	490
L.2.3	Préparation des données	492
L.2.4	Principes et exigences d'un essai de sensibilité.....	493
L.2.5	Evaluation de l'importance d'une variable environnementale.....	498
L.2.6	Evaluation de l'interdépendance entre les variables environnementales	500
L.2.7	Calcul de la classe de précision.....	502
L.2.8	Critères d'acceptation	504
L.2.9	Classification du RSD	505
L.3	Vérification des performances des dispositifs de télédétection	505
L.4	Evaluation de l'incertitude des mesures des dispositifs de télédétection	508
L.4.1	Généralités	508
L.4.2	Incetitude de référence.....	509
L.4.3	Incetitude résultant de l'essai d'étalonnage du RSD	509
L.4.4	Incetitude due à la classification du dispositif de télédétection.....	511
L.4.5	Incetitude due à l'écoulement non homogène dans le volume de mesure	512
L.4.6	Incetitude due aux effets de montage	512
L.4.7	Incetitude due à la variation de l'écoulement sur le site	512
L.5	Contrôles supplémentaires.....	512
L.5.1	Surveillance de la performance du dispositif de télédétection sur le site d'application	512
L.5.2	Identification du dysfonctionnement du dispositif de télédétection.....	513
L.5.3	Contrôle de cohérence de l'évaluation des incertitudes systématiques du dispositif de télédétection	513
L.5.4	Essai in situ du dispositif de télédétection.....	514
L.6	Autres exigences spécifiques à l'essai de courbe de puissance	514
L.7	Rapports	516
L.7.1	Rapport commun sur l'essai de classification, l'essai d'étalonnage et la surveillance du dispositif de télédétection lors de l'application	516
L.7.2	Rapport supplémentaire sur l'essai de classification	516
L.7.3	Rapport supplémentaire sur l'essai d'étalonnage	517
L.7.4	Rapport supplémentaire sur l'application	517

Annexe M (informative) Normalisation des données de courbe de puissance conformément à l'intensité des turbulences.....	518
M.1 Généralités	518
M.2 Procédure de normalisation des turbulences	518
M.3 Détermination de la courbe de puissance en l'absence de turbulences	520
M.4 Ordre de la correction du cisaillement du vent (normalisation) et de la normalisation des turbulences.....	529
M.5 Incertitude de la normalisation des turbulences ou des courbes de puissance dues aux effets des turbulences.....	530
Annexe N (informative) Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les capteurs de direction du vent	532
N.1 Généralités	532
N.2 Exigences générales.....	532
N.3 Exigences pour la soufflerie	532
N.4 Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage	533
N.5 Procédure d'étalonnage	535
N.6 Analyse des données.....	535
N.7 Analyse d'incertitude.....	536
N.8 Format de rapport	536
N.9 Exemple de calcul d'incertitude.....	537
N.9.1 Généralités.....	537
N.9.2 Incertitudes de mesure pour la détermination de la direction de l'écoulement dans la soufflerie.....	538
N.9.3 Contribution à l'incertitude de mesure par le capteur de direction du vent	539
N.9.4 Résultats du calcul d'incertitude	540
Annexe O (informative) Essai de performance de puissance dans un climat froid	542
O.1 Généralités	542
O.2 Recommandations	542
O.2.1 Généralités.....	542
O.2.2 Anémomètres à ultrasons	542
O.2.3 Anémomètres à coupelles.....	542
O.3 Incertitudes	543
O.4 Rapports.....	543
Annexe P (informative) Procédure de normalisation du cisaillement du vent	544
P.1 Généralités	544
Annexe Q (informative) Définition de la vitesse du vent équivalente du rotor en prenant en compte la déviation de la trajectoire du vent.....	546
Q.1 Généralités	546
Q.2 Définition de la vitesse du vent équivalente du rotor en prenant en compte la déviation de la trajectoire du vent	547
Q.3 Mesure de la déviation de la trajectoire du vent	547
Q.4 Normalisation du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent combinés.....	548
Annexe R (informative) Considérations relatives aux incertitudes pour les essais sur plusieurs éoliennes	549
R.1 Généralités	549
Annexe S (informative) Correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât pour les mâts en treillis.....	554
Bibliographie.....	558

Figure 1 – Exigences de distance entre le matériel de mesure du vent et les secteurs de mesure maximaux admis.....	294
Figure 2 – Hauteurs de mesure du cisaillement du vent appropriées pour la mesure de la vitesse du vent équivalente du rotor.....	300
Figure 3 – Hauteurs de mesure du cisaillement du vent lorsqu'aucune mesure de la vitesse du vent à une hauteur supérieure à celle du moyeu n'est disponible (uniquement pour la détermination de l'exposant de cisaillement du vent).....	301
Figure 4 – Processus d'application des différentes normalisations	305
Figure 5 – Présentation d'un exemple de base de données: diagramme de dispersion de l'essai de performance de puissance échantillonné à 1 Hz (valeurs moyennes moyennées sur 10 min).....	317
Figure 6 – Présentation d'un exemple de courbe de puissance mesurée.....	318
Figure 7 – Présentation d'un exemple de courbe C_p	318
Figure A.1 – Secteurs à exclure en raison des sillages d'éoliennes voisines en exploitation et d'obstacles significatifs	324
Figure A.2 – Exemple de secteurs à exclure en raison des sillages de l'éolienne à l'essai, d'une éolienne voisine en exploitation et d'un obstacle significatif	325
Figure B.1 – Représentation de la surface à évaluer, vue de dessus	328
Figure B.2 – Exemple de détermination de la pente et de la variation du terrain par rapport au plan idéal pour la distance "2L à 4L" et le cas "secteur de mesure" (Tableau B.1, ligne 2)	329
Figure B.3 – Détermination de la pente pour les distances "2L à 4L" et "8L à 16L" et le cas "à l'extérieur du secteur de mesure" (Tableau B.1, ligne 3 et ligne 5)	329
Figure C.1 – Organigramme d'étalonnage du site.....	333
Figure C.2 – Types de terrains.....	335
Figure C.3 – Exemple de résultats d'essai de vérification.....	348
Figure C.4 – Exposant de cisaillement du vent en fonction de l'heure du jour, exemple A.....	350
Figure C.5 – Exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à l'emplacement du mât météorologique de référence, exemple A où l'axe de couleur = vitesse du vent (en m/s)	351
Figure C.6 – Rapports de vitesse du vent et nombre de points de données en fonction de l'exposant de cisaillement du vent et de la tranche de direction du vent – rapports de vitesse du vent (lignes pleines), nombre de points de données (lignes en pointillés)	352
Figure C.7 – Contrôle de la convergence des données pour la tranche à 190°	354
Figure C.8 – Exposant de cisaillement du vent par rapport à l'heure du jour, exemple B	355
Figure C.9 – Exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à l'emplacement du mât météorologique de référence, exemple B	356
Figure C.10 – Régression linéaire de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu du mât météorologique de référence pour la tranche à 330°	357
Figure C.11 – Rapports de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent pour la tranche à 330°	358
Figure C.12 – Rapports de vitesses du vent en fonction du cisaillement du vent pour la tranche à 330°	359
Figure C.13 – Exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport au post-filtrage du mât météorologique de référence	360

Figure C.14 – Régression linéaire de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu du mât météorologique de référence pour la tranche à 330°, post-filtrage	361
Figure C.15 – Rapports de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent pour la tranche à 330°, post-filtrage.....	362
Figure C.16 – Contrôle de la convergence des données pour la tranche à 330°	363
Figure C.17 – Cisaillement du vent lors de l'étalonnage du site par rapport au cisaillement du vent lors de l'essai de courbe de puissance	364
Figure C.18 – Contrôle de la convergence pour la tranche à 270°	366
Figure F.1 – Définition du volume pour l'essai d'uniformité d'écoulement – Le volume présentera également une profondeur de $1,5 \times b$ (le long de l'écoulement)	435
Figure G.1 – Exemple d'anémomètre monté en tête de mât et exigences de montage.....	446
Figure G.2 – Exemple d'anémomètre de commande et d'anémomètre principal alternatifs montés en tête de mât et côte à côte, avec une girouette et d'autres instruments sur la flèche	449
Figure G.3 – Tracé des isovitesses de la vitesse locale d'écoulement autour d'un mât météorologique cylindrique	450
Figure G.4 – Vitesse du vent par rapport à l'axe central en fonction de la distance R_d à partir du centre d'un mât météorologique tubulaire et du diamètre d du mât météorologique	451
Figure G.5 – Représentation d'un mât météorologique en treillis à trois pieds.....	452
Figure G.6 – Tracé des isovitesses de la vitesse locale d'écoulement autour d'un mât météorologique en treillis triangulaire pour lequel $C_T = 0,5$	453
Figure G.7 – Vitesse du vent par rapport à l'axe central en fonction de la distance R_d du centre d'un mât météorologique en treillis triangulaire et de la distance entre les pieds L_m pour plusieurs valeurs de C_T	454
Figure G.8 – Distorsion de l'écoulement déduite par la mécanique des fluides numérique 3D pour deux directions différentes du vent autour d'un mât météorologique en treillis triangulaire ($C_T = 0,27$) – La flèche rouge en bas à droite de chaque figure indique la direction de l'écoulement	456
Figure H.1 – Définition de la hauteur du moyeu et de l'emplacement du mât météorologique pour les éoliennes à axe vertical	460
Figure J.1 – Réponse de l'angle d'inclinaison $V_\alpha / V_{\alpha=0}$ d'un anémomètre à coupelles en fonction de l'angle d'écoulement α comparée à la réponse du cosinus	470
Figure J.2 – Mesures du couple $Q_A - Q_F$ dans une soufflerie en fonction de la vitesse angulaire ω d'un rotor d'anémomètre à coupelles à 8 m/s	471
Figure J.3 – Exemple de couple de frottement des paliers Q_F en fonction de la température pour une plage de vitesses angulaires ω	473
Figure J.4 – Exemple de coefficient de couple du rotor C_{QA} en fonction du rapport de vitesse λ déduit à partir des réponses échelonnées avec K_{low} égal à $-5,5$ et K_{high} égal à $-6,5$	477
Figure J.5 – Ecarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 1,69A (image du haut) et une classe 6,56B (image du bas).....	481
Figure J.6 – Ecarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 8,01C (image du haut) et une classe 9,94D (image du bas)	482
Figure K.1 – Exemple avec mât météorologique en treillis triangulaire	487
Figure K.2 – Exemple avec mât météorologique tubulaire	488
Figure L.1 – Ecart par rapport à l'angle d'écoulement ascendant déterminé pour un dispositif de télédétection en fonction de l'anémomètre à coupelles de la Figure J.1	494
Figure L.2 – Exemple d'analyse de sensibilité en fonction du cisaillement du vent	496

Figure L.3 – Exemple de cisaillement du vent par rapport à l'intensité des turbulences	500
Figure L.4 – Exemple d'écart en pourcentage entre les mesures du dispositif de télédétection et celles du capteur de référence en fonction de l'intensité des turbulences	501
Figure L.5 – Comparaison des moyennes sur 10 min de la composante de vitesse horizontale du vent mesurée par un dispositif de télédétection et par un anémomètre à coupelles	507
Figure L.6 – Comparaison par tranche de la mesure de la composante de vitesse horizontale du vent par un dispositif de télédétection et par un anémomètre à coupelles	508
Figure L.7 – Exemple de plage d'emplacements admise du volume de mesure	515
Figure M.1 – Processus d'obtention d'une courbe de puissance pour une intensité des turbulences spécifique ($I_{\text{reference}}$)	519
Figure M.2 – Processus d'obtention des paramètres de la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences depuis les données mesurées	522
Figure M.3 – Première approche pour la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences	523
Figure M.4 – Processus d'obtention de la courbe de puissance théorique en l'absence de turbulences depuis les données mesurées	526
Figure M.5 – Courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences ajustée (verte) comparée à la première approche (rouge)	527
Figure M.6 – Processus d'obtention de la courbe de puissance finale en l'absence de turbulences depuis les données mesurées	528
Figure M.7 – Courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences ajustée (verte) comparée à la courbe de puissance finale en l'absence de turbulences (noire)	529
Figure N.1 – Exemple de montage d'étalonnage d'un capteur de direction du vent dans une soufflerie	535
Figure Q.1 – Profils de vent mesurés à l'aide d'un dispositif LIDAR sur un terrain plat	546
Figure S.1 – Exemple de distorsion de l'écoulement au niveau du mât	555
Figure S.2 – Résidus de la distorsion de l'écoulement en fonction de la direction	557
Tableau 1 – Vue d'ensemble des configurations de mesure du vent pour les mesures de la courbe de puissance qui satisfont aux exigences de la présente norme	292
Tableau 2 – Configurations de mesure de la vitesse du vent (X indique une configuration admissible)	296
Tableau 3 – Exemple de calcul de REWS	307
Tableau 4 – Exemple de présentation d'une courbe de puissance mesurée	319
Tableau 5 – Exemple de présentation d'une production annuelle d'énergie estimée	320
Tableau A.1 – Exigences relatives aux obstacles: pertinence des obstacles	322
Tableau B.1 – Exigences relatives au site d'essai: variations topographiques	328
Tableau C.1 – Corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site (rapport de vitesses du vent)	353
Tableau C.2 – Nombre de données d'étalonnage du site	353
Tableau C.3 – Valeurs r^2 pour chaque tranche de direction du vent	363
Tableau C.4 – Incertitude supplémentaire due à des variations dans les tranches	364
Tableau C.5 – Incertitude supplémentaire due à des variations dans les tranches	367
Tableau D.1 – Liste des composantes d'incertitude	368
Tableau E.1 – Incertitudes élargies	374

Tableau E.2 – Liste des incertitudes de catégories A et B	375
Tableau E.3 – Exemples d'incertitudes-types dues à l'absence de mesures du cisaillement du vent	404
Tableau E.4 – Exemples d'incertitudes-types dues à l'absence de mesures de la déviation de la trajectoire du vent	406
Tableau E.5 – Contributions d'incertitudes dues au fait que l'écoulement ascendant n'est pas connu.....	407
Tableau E.6 – Contributions d'incertitudes dues au fait que l'intensité des turbulences n'est pas connue.....	408
Tableau E.7 – Hypothèses suggérées pour les corrélations des incertitudes de mesure entre différentes hauteurs de mesure.....	416
Tableau E.8 – Hypothèses de corrélation suggérées pour les incertitudes de mesure de la direction du vent à différentes hauteurs de mesure	423
Tableau E.9 – Incertitudes liées à la normalisation de la masse volumique de l'air	430
Tableau E.10 – Facteurs de sensibilité	432
Tableau E.11 – Incertitudes de catégorie B.....	433
Tableau F.1 – Exemple d'évaluation de l'incertitude d'étalonnage d'un anémomètre	441
Tableau G.1 – Méthode d'estimation de la valeur C_T pour divers types de mâts en treillis.....	455
Tableau H.1 – Réglages de la tension du banc de batteries	461
Tableau I.1 – Plages des paramètres d'influence (moyennes de 10 min) des classes A, B, C, D et S	466
Tableau J.1 – Réponse de l'angle d'inclinaison de l'exemple d'anémomètre à coupelles	479
Tableau J.2 – Coefficients de frottement de l'exemple d'anémomètre à coupelles	480
Tableau J.3 – Données diverses relatives à la classification de l'exemple d'anémomètre à coupelles	480
Tableau L.1 – Exemple de largeur de tranche pour une liste de variables environnementales.....	495
Tableau L.2 – Paramètres déduits d'une analyse de sensibilité d'un dispositif de télédétection	497
Tableau L.3 – Plages des paramètres environnementaux pour l'analyse de la sensibilité	498
Tableau L.4 – Exemple de choix de variables environnementales qui se révèlent avoir un impact significatif	499
Tableau L.5 – Paramètres de l'analyse de sensibilité restants après l'analyse de l'interdépendance des variables	502
Tableau L.6 – Exemple de schéma de calcul de l'impact maximal des variables environnementales.....	503
Tableau L.7 – Classes de précision préliminaires d'un dispositif de télédétection compte tenu de toutes les variables ou des variables d'influence les plus importantes seulement.....	503
Tableau L.8 – Exemple de classes finales de précision d'un dispositif de télédétection	504
Tableau L.9 – Exemple de calculs d'incertitude découlant de l'étalonnage d'un dispositif de télédétection (RSD) en termes d'incertitudes systématiques.....	510
Tableau N.1 – Contributions d'incertitude dans l'étalonnage du capteur de direction du vent	540

Tableau N.2 – Contributions d'incertitude et incertitude-type totale d'étalonnage du capteur de direction du vent.....	541
Tableau R.1 – Liste des composantes d'incertitude corrélées	550

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

**Partie 12-1: Mesures de performance de puissance
des éoliennes de production d'électricité**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 61400-12-1 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Systèmes de génération d'énergie éolienne.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2005. Cette édition constitue une révision technique. Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) nouvelle définition de la vitesse du vent;
- b) inclusion du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent;
- c) correction de la masse volumique de l'air;
- d) révision de l'étalonnage du site;
- e) révision de la définition de la courbe de puissance;

- f) interpolation de la méthode utilisant le centre de la tranche;
- g) révision du modèle d'obstacle;
- h) clarification des exigences relatives à la topographie;
- i) nouvelle annexe sur la distorsion de l'écoulement produite par le mât;
- j) révision de la classification des anémomètres;
- k) inclusion des anémomètres à ultrasons;
- l) ajout d'une annexe sur les climats froids;
- m) modification de la base de données A en base de données spéciale;
- n) révision de l'annexe sur l'incertitude;
- o) inclusion de la télédétection.

L'IEC 61400-12-2 est un complément à l'IEC 61400-12-1.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
88/610/FDIS	88/617/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61400, publiées sous le titre général *Systèmes de génération d'énergie éolienne*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Les futures normes de cette série porteront dorénavant le nouveau titre général cité ci-dessus. Le titre des normes existant déjà dans cette série sera mis à jour lors de la prochaine édition.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité est conscient que la mise en œuvre de cette révision est considérablement plus complexe, voire plus difficile. Néanmoins, le comité tente de traiter de son mieux les questions relatives à l'exploitation des grandes éoliennes sous un cisaillement du vent important et sur un terrain complexe. Le comité recommande que les nouvelles techniques présentées soient immédiatement validées par des laboratoires d'essais dans le cadre d'essais d'aptitude interlaboratoires. Le comité recommande de rédiger, dans les trois ans qui suivent la publication du présent document, un Rapport de Révision de maintenance contenant des recommandations, des clarifications et des simplifications qui amélioreront la mise en œuvre pratique de la présente norme. Si nécessaire, il convient de proposer une révision au moment de l'intégration de ces recommandations, clarifications et simplifications.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

L'objectif de la présente partie de l'IEC 61400 est de fournir une méthodologie uniforme qui garantira la cohérence, la précision et la reproductibilité de la mesure et de l'analyse de la performance de puissance des éoliennes. La présente norme a été établie en vue d'être appliquée par:

- a) les fabricants d'éoliennes dans le cadre de leurs efforts pour satisfaire à des exigences de performance de puissance bien définies et/ou à un système de déclaration éventuel;
- b) les acheteurs d'éoliennes lors de la spécification de telles exigences de performance;
- c) les opérateurs d'éoliennes qui peuvent devoir vérifier que les unités neuves ou remises en état satisfont aux spécifications de performance de puissance indiquées, voire exigées;
- d) les autorités d'urbanisme ou de régulation en matière d'éoliennes, qui doivent être en mesure de définir de manière juste et acceptable les caractéristiques de performance de puissance des éoliennes au titre de la réglementation ou des exigences relatives aux autorisations applicables aux installations neuves ou modifiées.

Le présent document fournit des lignes directrices sur la mesure, l'analyse et la consignation des rapports d'essai de performance de puissance des éoliennes. Le document concerne les parties impliquées dans la fabrication, la planification d'installation et la délivrance de permis, l'exploitation, l'utilisation et la réglementation des éoliennes. Il convient que toutes les parties appliquent les techniques de mesure et d'analyse techniquement précises recommandées dans la présente norme pour garantir le développement et l'exploitation en continu des éoliennes dans un climat de communication cohérente et exacte vis-à-vis de la performance des éoliennes. Le présent document décrit les procédures de mesure et de rapport qui sont réputées donner des résultats précis pouvant être reproduits par d'autres personnes. D'autre part, il convient que les utilisateurs de la présente norme soient informés des différences qui apparaissent en cas de variations importantes du cisaillement du vent et des turbulences. Par conséquent, il convient que les utilisateurs tiennent compte de l'influence de ces différences ainsi que des critères de choix des données par rapport à l'objectif de l'essai avant de procéder aux mesures de performance de puissance.

La mesure de la vitesse du vent constitue un élément fondamental des essais de performance de puissance. Pour mesurer le vent, le présent document prescrit l'utilisation d'anémomètres à coupelles, d'anémomètres à ultrasons ou de dispositifs de télédétection (RSD, *Remote Sensing Device*) utilisés en conjonction avec des anémomètres. Même si les procédures appropriées sont appliquées pour l'étalonnage/la validation et la classification, la nature même du principe de mesure de ces dispositifs peut altérer leur fonctionnement. Ces instruments sont résistants et ont été jugés appropriés pour ce type d'essai, à ceci près que certains d'entre eux sont limités à des classes spécifiques de terrains.

Sachant que la taille des éoliennes ne cesse d'augmenter, la vitesse du vent mesurée à une même hauteur est de moins en moins susceptible de représenter avec précision la vitesse du vent traversant le rotor de l'éolienne dans son ensemble. Par conséquent, la présente norme introduit une définition supplémentaire de la vitesse du vent. Auparavant, la vitesse du vent était mesurée à la hauteur du moyeu seulement. A présent, cette caractéristique peut être complétée par la vitesse du vent équivalente du rotor (REWS, *Rotor Equivalent Wind Speed*), déterminée par une combinaison arithmétique de mesures simultanées de la vitesse du vent à différentes hauteurs allant de l'extrémité inférieure à l'extrémité supérieure du rotor, couvrant ainsi la totalité du diamètre du rotor. Les courbes de puissance définies par la vitesse du vent à la hauteur du moyeu et par la REWS ne sont pas identiques; la courbe de puissance de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est toujours présentée à titre de comparaison lorsqu'une courbe de puissance de REWS est mesurée. En raison de cette différence de définition de la vitesse du vent, la production annuelle d'énergie (*AEP*) déduite à partir de la combinaison d'une courbe de puissance mesurée et d'une distribution des vitesses du vent utilise une courbe de puissance et une distribution des vitesses du vent qui appliquent la même définition de la vitesse du vent.

Les procédures de classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons sont données aux Annexes I et J. Les procédures de classification des dispositifs de télédétection sont données à l'Annexe L. Il convient de porter une attention particulière au choix des instruments utilisés pour mesurer la vitesse du vent car ce choix peut influencer le résultat de l'essai.

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 12-1: Mesures de performance de puissance des éoliennes de production d'électricité

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 spécifie une procédure de mesure des caractéristiques de performance de puissance d'une éolienne simple et s'applique aux essais d'éoliennes raccordées au réseau électrique de tous types et de toutes tailles. En outre, la présente norme décrit une procédure qui doit être utilisée pour déterminer les caractéristiques de performance de puissance des petites éoliennes (définies dans l'IEC 61400-2) raccordées soit au réseau électrique, soit à un banc de batteries. La procédure peut être utilisée pour évaluer la performance d'éoliennes spécifiques sur des sites spécifiques, mais la méthodologie peut également être utilisée pour procéder à des comparaisons génériques entre différents modèles d'éoliennes ou différents réglages d'éoliennes lorsque les influences des conditions spécifiques au site et du filtrage de données sont étudiées.

Les caractéristiques de performance de puissance des éoliennes sont déterminées par la courbe de puissance mesurée et la production annuelle d'énergie (*AEP*) estimée. La courbe de puissance mesurée, définie comme la relation entre la vitesse du vent et la puissance de sortie de l'éolienne, est déterminée en compilant des mesures simultanées des variables météorologiques (notamment la vitesse du vent), ainsi que des signaux d'éoliennes (notamment la puissance de sortie) sur le site d'essai pendant une période suffisamment longue pour constituer une base de données statistiquement significative sur une plage donnée de vitesses du vent et dans des conditions de vent et des conditions atmosphériques variables. La production annuelle d'énergie (*AEP*) est calculée en appliquant la courbe de puissance mesurée aux distributions de fréquence de vitesses du vent de référence, en prenant pour hypothèse une disponibilité de 100 %.

Le présent document décrit une méthodologie de mesure qui exige que les valeurs de la courbe de puissance mesurée et de la production d'énergie déduite soient complétées par une évaluation des sources d'incertitude et de leurs effets associés.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60688:2012, *Transducteurs électriques de mesure convertissant les grandeurs électriques alternatives ou continues en signaux analogiques ou numériques*

IEC 61400-12-2:2013, *Eoliennes – Partie 12-2: Performance de puissance des éoliennes de production d'électricité basée sur l'anémométrie de nacelle*

IEC 61869-1:2007, *Transformateurs de mesure – Partie 1: Exigences générales*

IEC 61869-2:2012, *Transformateurs de mesure – Partie 2: Exigences supplémentaires concernant les transformateurs de courant*

IEC 61869-3:2011, *Transformateurs de mesure – Partie 3: Exigences supplémentaires concernant les transformateurs inductifs de tension*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

ISO/IEC 17025:2005, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

ISO/IEC 17043:2010, *Evaluation de la conformité – Exigences générales concernant les essais d'aptitude*

ISO 2533:1975, *Atmosphère type*

ISO 3966:2008, *Mesurage du débit des fluides dans les conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

précision

étroitesse de la correspondance entre le résultat d'une mesure et une valeur vraie du mesurande

3.2

production annuelle d'énergie

AEP

estimation de la production totale d'énergie d'une éolienne pendant un an en appliquant la courbe de puissance mesurée à diverses distributions de fréquence de vitesses du vent de référence à la hauteur du moyeu, en supposant une disponibilité de 100 %

Note 1 à l'article: L'abréviation " *AEP* " est dérivée du terme anglais développé correspondant "*annual energy production*".

3.3

stabilité atmosphérique

mesure de la tendance du vent à stimuler ou inhiber le brassage vertical

Note 1 à l'article: Une atmosphère stable est caractérisée par un gradient de température élevé avec l'altitude, un fort cisaillement du vent, une éventuelle déviation de la trajectoire du vent et de faibles turbulences par rapport aux conditions instables. Une atmosphère neutre et instable se traduit généralement par de faibles gradients de température et un faible cisaillement du vent.

3.4

terrain complexe

terrain entourant le site d'essai, et présentant des variations topographiques notables et des obstacles (voir 3.18) pouvant entraîner une distorsion de l'écoulement de l'air

3.5

vitesse de démarrage

vitesse du vent la plus basse à laquelle une éolienne commence à fournir une puissance

3.6

vitesse de coupure

vitesse à laquelle une éolienne est coupée du réseau électrique en raison d'une vitesse élevée du vent

3.7

ensemble de données

collection de données qui ont été échantillonnées sur une période continue

3.8

constante de distance

indication du temps de réponse d'un anémomètre définie comme la longueur de l'écoulement d'air qui doit passer à travers l'instrument afin que celui-ci indique 63 % de la valeur finale pour une variation en échelon de la vitesse du vent en entrée

3.9

courbe de puissance extrapolée

prolongement de la courbe de puissance mesurée obtenu en estimant la production de puissance entre la vitesse maximale du vent mesurée et la vitesse de coupure

3.10

distorsion de l'écoulement

changement dans l'écoulement de l'air causé par des obstacles, des variations topographiques ou par d'autres éoliennes, qui se traduit par un écart entre la vitesse du vent au point de mesure et la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne

3.11

hauteur du moyeu (des éoliennes)

hauteur du centre de la surface balayée par le rotor de l'éolienne par rapport au sol au niveau du mât

Note 1 à l'article: Pour une éolienne à axe vertical, la hauteur du moyeu est la hauteur du centroïde de la surface balayée par le rotor par rapport au sol au niveau du mât.

3.12

courbe de puissance mesurée

tableau et graphique représentant la puissance de sortie nette d'une éolienne mesurée, corrigée et normalisée, en fonction de la vitesse du vent mesurée selon une procédure de mesure bien définie

3.13

période de mesure

période pendant laquelle une base de données statistiquement significative a été recueillie pour l'essai de performance de puissance

3.14

secteur de mesure

secteur des directions du vent dans lequel les données sont choisies pour la courbe de puissance mesurée

3.15

méthode des tranches

procédure de réduction des données selon laquelle les données d'essai pour un paramètre donné sont groupées en intervalles (tranches)

Note 1 à l'article: Pour chaque tranche, le nombre d'ensembles de données ou d'échantillons et leur somme sont enregistrés, et la moyenne de la valeur du paramètre à l'intérieur de chaque tranche est calculée.

3.16**puissance électrique active nette**

mesure de la puissance de sortie électrique de l'éolienne fournie au réseau électrique

3.17**maintenance normale**

toute intervention effectuée conformément à un programme de maintenance régulière définie, indépendamment de tout essai de performance de puissance, par exemple un changement d'huile, un lavage des pales (s'il est nécessaire, indépendamment de l'essai de performance de puissance) et toute intervention ne relevant pas du programme de maintenance régulière, (par exemple la réparation d'un composant défectueux) et ne constituant pas une modification de configuration de la machine

3.18**obstacles**

objets faisant obstacle au vent et créant une distorsion de l'écoulement, tels que des bâtiments et des arbres

3.19**angle de pas**

angle entre la corde à un endroit défini du rayon de la pale (habituellement à 100 % du rayon de la pale) et le plan de rotation du rotor

3.20**coefficient de puissance**

rapport de la puissance électrique nette d'une éolienne, à la puissance disponible dans le vent en écoulement libre sur la surface balayée par le rotor

3.21**performance de puissance**

mesure de l'aptitude d'une éolienne à produire de la puissance et de l'énergie électriques

3.22**puissance assignée**

quantité de puissance assignée, généralement par un fabricant, pour une condition d'exploitation spécifiée d'un composant, d'un dispositif ou d'un matériel

3.23**vitesse du vent équivalente du rotor**

vitesse du vent correspondant au flux d'énergie cinétique traversant la surface balayée par le rotor en tenant compte de la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur, représentée à l'Equation (5)

3.24**maintenance spéciale**

toute intervention ne relevant pas du programme de maintenance régulière et ne constituant pas une modification de configuration de la machine, c'est-à-dire toute intervention effectuée dans le but d'améliorer la performance de puissance au cours d'une période d'essai, par exemple lavage des pales non programmé ou remplacement d'un composant essentiel

3.25**incertitude-type**

incertitude du résultat d'une mesure exprimée sous la forme d'un écart-type

3.26**surface balayée**

pour une éolienne à axe horizontal, surface projetée par le rotor mobile sur un plan perpendiculaire à l'axe de rotation

Note 1 à l'article: Pour les rotors à balancier, il convient de prendre pour hypothèse que le rotor reste perpendiculaire par rapport à l'arbre primaire. Pour une éolienne à axe vertical, surface projetée par le rotor mobile sur un plan vertical.

3.27

site d'essai

emplacement de l'éolienne à l'essai et ses environs

3.28

incertitude de mesure

paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande

3.29

matériel de mesure du vent

mât météorologique ou dispositif de télédétection

3.30

cisaillement du vent

variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur sur le rotor de l'éolienne

3.31

exposant de cisaillement du vent

exposant α de la loi exponentielle définissant la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur

Note 1 à l'article: Ce paramètre est utilisé comme mesure de l'amplitude du cisaillement du vent pour l'étalonnage du site de l'Annexe C et peut être utile à d'autres égards. L'équation exponentielle est la suivante:

$$v_{zi} = v_h \left(\frac{z_i}{H} \right)^\alpha \quad (1)$$

où

v_h est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu;

H est la hauteur du moyeu (m);

v_{zi} est la vitesse du vent à la hauteur z_i

α est l'exposant de cisaillement du vent.

3.32

déviatio n de la trajectoire du vent

variation de la direction du vent en fonction de la hauteur sur le rotor de l'éolienne

4 Symboles et unités

A	surface balayée par le rotor de l'éolienne	[m ²]
A_i	surface du i^{e} segment du rotor de l'éolienne	[m ²]
A_w	facteur d'échelle de Weibull	[m/s]
AEP	production annuelle d'énergie	[Wh]
B	pression atmosphérique	[Pa]
$B_{10\text{min}}$	pression atmosphérique moyennée sur une période de 10 min	[Pa]
Ch	coefficient de la tête du tube de Pitot	
$C_{P,i}$	coefficient de puissance dans la tranche i	
C_{QA}	coefficient de couple aérodynamique généralisé	
C_T	coefficient de poussée	
c	facteur de sensibilité d'un paramètre (dérivée partielle)	

$c_{B,i}$	facteur de sensibilité de la pression atmosphérique dans la tranche i	[W/Pa]
$c_{d,i}$	facteur de sensibilité du système d'acquisition de données dans la tranche i	
c_{index}	facteur de sensibilité du paramètre d'indice	
$c_{k,i}$	facteur de sensibilité de la composante k dans la tranche i	
$c_{T,i}$	facteur de sensibilité de la température de l'air dans la tranche i	[W/K]
$c_{V,i}$	facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i	[Ws/m]
$c_{\rho,i}$	facteur de sensibilité de la correction de la masse volumique de l'air dans la tranche i	[Wm ³ /kg]
D	diamètre du rotor	[m]
D_e	diamètre équivalent du rotor	[m]
D_n	diamètre du rotor de l'éolienne voisine en exploitation	[m]
d	diamètre du mât météorologique	[m]
$F(V)$	fonction de distribution de probabilité cumulative de Rayleigh pour la vitesse du vent	
f_i	occurrence relative de la vitesse du vent dans un intervalle de vitesse du vent	
$f_{r,MM}$	facteur de correction du cisaillement du vent, mesuré à l'aide d'instruments montés sur le mât météorologique	
$f_{r,RSD}$	facteur de correction du cisaillement du vent, mesuré à l'aide d'un dispositif de télédétection	
H	hauteur du moyeu de l'éolienne	[m]
h	hauteur de l'obstacle	[m]
I	inertie du rotor de l'anémomètre à coupelles	[kgm ²]
k	numéro de classe	
k	facteur de forme de Weibull	
k_b	facteur de correction de l'obstruction	
k_c	facteur d'étalonnage de la soufflerie	
k_f	facteur de correction de la soufflerie par rapport aux autres souffleries (uniquement utilisé pour les estimations de l'incertitude)	
k_ρ	facteur de correction d'humidité par rapport à la masse volumique	
$K_{B,t}$	sensibilité du baromètre	[N/m ² V]
$K_{B,s}$	gain du baromètre	
$K_{B,d}$	conversion d'échantillonnage du baromètre	
$K_{T,t}$	sensibilité du transducteur de température	[K/A]
$K_{T,s}$	gain du transducteur de température	[A/V]
$K_{T,d}$	conversion d'échantillonnage du transducteur de température	
$K_{p,t}$	sensibilité du transducteur de pression	
$K_{p,s}$	gain du transducteur de pression	
$K_{p,d}$	conversion d'échantillonnage du transducteur de pression	
L_m	distance entre les pieds adjacents du mât météorologique en treillis	[m]
L	distance entre l'éolienne et le matériel de mesure du vent	[m]
L_e	distance entre l'éolienne ou le matériel de mesure du vent et un obstacle	[m]
L_n	distance entre l'éolienne ou le matériel de mesure du vent et une éolienne voisine en exploitation	[m]

l_h	hauteur de l'obstacle	[m]
l_w	largeur de l'obstacle	[m]
M	nombre de composantes d'incertitude dans chaque tranche	
M_A	nombre de composantes d'incertitude de catégorie A	
M_B	nombre de composantes d'incertitude de catégorie B	
N	nombre de tranches	
N_h	nombre d'heures dans une année ≈ 8760	[h]
N_i	nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche i de vitesse du vent	
N_j	nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche j de direction du vent	
n	nombre d'échantillons dans un intervalle d'échantillonnage	
n_h	nombre de hauteurs de mesure disponibles	
P_o	porosité d'un obstacle (0: solide, 1: aucun obstacle)	
P_i	puissance de sortie normalisée et moyennée dans la tranche i	[W]
P_n	puissance de sortie normalisée	[W]
$P_{n,i,j}$	puissance de sortie normalisée de l'ensemble de données j dans la tranche i	[W]
P_{10min}	puissance moyennée sur une période de 10 min	[W]
P_w	pression de vapeur	[Pa]
Q_A	couple aérodynamique	[Nm]
Q_f	couple de frottement	[Nm]
R	rayon du rotor	[m]
R_0	constante des gaz pour l'air sec (287,05)	[J/kgK]
R_d	distance jusqu'au centre du mât météorologique	[m]
R_w	constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5)	[J/kgK]
RSD	dispositif de télédétection	
r	coefficient de corrélation	
s	composante d'incertitude-type de catégorie A	
s_A	incertitude-type de catégorie A sur le chronogramme de la vitesse du vent dans la soufflerie	
$s_{k,i}$	incertitude-type de catégorie A sur la composante k dans la tranche i	
s_i	incertitudes composées de catégorie A dans la tranche i	
$s_{P,i}$	incertitude-type de catégorie A sur la puissance dans la tranche i	[W]
s_{sc}	incertitude-type de catégorie A sur l'étalonnage du site	[m/s]
$s_{w,i}$	incertitude-type de catégorie A sur les variations climatiques	[Wh]
$s_{\alpha,j}$	incertitude-type de catégorie A sur les rapports de vitesses du vent dans la tranche j	
S	solidité du mât météorologique	
T	température absolue	[K]
TI	intensité des turbulences (" <i>turbulence intensity</i> ")	
T_{10min}	température absolue de l'air moyennée sur une période de 10 min	[K]
t	temps	[s]
U	vitesse du vent	[m/s]
U_d	déficit de vitesse du vent de l'axe central	[m/s]
U_{eq}	vitesse horizontale du vent équivalente	[m/s]

U_i	vitesse du vent dans la tranche i	[m/s]
U_t	seuil de vitesse du vent	[m/s]
U	vecteur de vitesse du vent	
u	composante d'incertitude-type de catégorie B	
u_{AEP}	incertitude-type composée sur la production annuelle d'énergie estimée	[Wh]
$u_{B,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la pression atmosphérique dans la tranche i	[Pa]
$u_{C,i}$	incertitude-type composée sur la puissance dans la tranche i	[W]
u_i	incertitudes composées de catégorie B dans la tranche i	
u_{index}	incertitude-type de catégorie B sur le paramètre d'indice	
$u_{k,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la composante k dans la tranche i	
$u_{P,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la puissance dans la tranche i	[W]
$u_{V,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la vitesse du vent dans la tranche i	[m/s]
$u_{T,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la température de l'air dans la tranche i	[K]
$u_{\alpha,i,j}$	incertitude-type composée sur l'étalonnage du site dans la tranche i de vitesse du vent et dans la tranche j de direction du vent	[m/s]
$u_{\rho,i}$	incertitude-type de catégorie B sur la correction de la masse volumique de l'air dans la tranche i	[kg/m ³]
V	vitesse du vent	[m/s]
V_{ave}	moyenne annuelle de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu	[m/s]
V_i	vitesse du vent normalisée et moyennée dans la tranche i	[m/s]
V_n	vitesse du vent normalisée	[m/s]
$V_{n,i,j}$	vitesse du vent normalisée de l'ensemble de données j dans la tranche i	[m/s]
V_{10min}	vitesse du vent moyennée sur une période de 10 min	[m/s]
v	composante de la vitesse du vent transversale	[m/s]
$\bar{v}$	vitesse moyenne de l'écoulement d'air	[m/s]
v_{eq}	vitesse du vent équivalente mesurée	[m/s]
$v_{eq,final}$	vitesse du vent équivalente du rotor finale	[m/s]
$v_{eq,MM}$	vitesse du vent équivalente mesurée à l'aide d'un mât météorologique	[m/s]
$v_{eq,RSD}$	vitesse du vent équivalente mesurée à l'aide d'un dispositif de télédétection	[m/s]
v_h	vitesse du vent à la hauteur du moyeu	[m/s]
$v_{h,MM}$	vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu à l'aide d'un mât météorologique	[m/s]
v_{hn}	vitesse du vent normalisée mesurée à la hauteur du moyeu pour un profil spécifique de cisaillement du vent	[m/s]
$v_{h,RSD}$	vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu à l'aide du dispositif de télédétection	[m/s]
v_i	vitesse du vent mesurée à la hauteur i	[m/s]
v_{zi}	vitesse du vent à la hauteur z_i	[m/s]
WME	matériel de mesure du vent (" <i>wind measurement equipment</i> ")	
w	composante verticale de la vitesse du vent	[m/s]

w_i	fonction de pondération pour la détermination de l'enveloppe des écarts	
X_k	paramètre moyenné sur une période de prétraitement	
$X_{10\min}$	paramètre moyenné sur une période de 10 min	
x	distance en aval d'un obstacle jusqu'au matériel de mesure du vent ou jusqu'à l'éolienne	[m]
z	hauteur au-dessus du sol	[m]
z_i	hauteur du i^{e} segment du rotor de l'éolienne	[m]
α	exposant de cisaillement du vent calculé à l'aide de la loi exponentielle	[°]
$\varepsilon_{\max,i}$	écart maximal pour toutes les tranches i de vitesse du vent dans la plage de vitesses du vent	[m/s]
θ	secteur perturbé	[°]
κ	constante de von Karman, 0,4	
λ	rapport de vitesses	
ρ	masse volumique de l'air	[kg/m ³]
ρ_0	masse volumique de l'air de référence	[kg/m ³]
$\rho_{10\min}$	masse volumique de l'air déduite moyennée sur une période de 10 min	[kg/m ³]
$\sigma_{P,i}$	écart-type des données de puissance normalisées dans la tranche i	[W]
$\sigma_{10\min}$	écart-type du paramètre moyenné sur une période de 10 min	
$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	écarts-types des vitesses longitudinale/transversale/verticale du vent	
Φ	humidité relative (plage de 0 % à 100 %)	
ω	vitesse angulaire	[s ⁻¹]

5 Vue d'ensemble de la méthode de performance de puissance

Le cisaillement du vent et la déviation de la trajectoire du vent peuvent varier de manière considérable sur la hauteur du rotor des grandes éoliennes en conditions de stabilité atmosphérique, mais également en fonction de la topographie du site. L'occurrence de conditions extrêmes de stabilité atmosphérique est une problématique spécifique au site. Si elles surviennent lors d'un essai de performance de puissance, la courbe de puissance peut varier de manière significative.

La méthode de mesure de performance de puissance utilisée dans la présente norme s'appuie sur une définition de la courbe de puissance exprimant la puissance produite par rapport à la vitesse du vent, et qui représente le flux d'énergie cinétique effectif dans l'écoulement du vent sur la surface balayée par le rotor.

Le flux d'énergie cinétique (à un instant donné ou sur une période donnée, habituellement 10 min, en prenant pour hypothèse que la vitesse du vent ne varie pas pendant cette période¹) sur la surface balayée verticale est généralement exprimé par l'équation suivante:

¹ Si la vitesse du vent varie (c'est-à-dire si l'intensité des turbulences > 0) pendant une période donnée, la puissance cinétique (moyennée sur la période donnée) est plus élevée que lorsque la vitesse du vent est constante; or une éolienne ne dispose que d'une capacité limitée à transformer cette énergie cinétique supplémentaire en puissance électrique supplémentaire. La présente norme ne traite pas cette question de manière approfondie. Pour des raisons de simplification, les Equations (2), (3) et (4) sont réputées valides, même en cas d'intensité des turbulences > 0. L'impact des variations de la vitesse du vent sur la puissance cinétique moyennée dans le temps et l'impact associé sur la courbe de puissance de l'éolienne sont traités par la procédure de normalisation des turbulences donnée à l'Annexe M.

$$P_{\text{kin}} = \int_A \frac{1}{2} \rho V^3 dA \quad (2)$$

Ici, la vitesse du vent V , mesurée en un point donné dans l'espace sur la surface du rotor, correspond à la vitesse horizontale du vent². La vitesse horizontale du vent est définie comme l'amplitude moyenne de la composante horizontale de la vitesse vectorielle instantanée du vent, incluant uniquement les composantes de turbulences longitudinale et latérale (mais pas la composante verticale). Dans le cas d'une éolienne à axe horizontal, la déviation de la trajectoire du vent est également prise en compte et l'énergie cinétique du vent est corrigée en fonction de la direction du vent à la hauteur du moyeu:

$$P_{\text{kin}} = \int_A \frac{1}{2} \rho (V \cos(\varphi - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA \quad (3)$$

Ici, φ_{hub} est la direction du vent à la hauteur du moyeu. La déviation de la trajectoire du vent peut varier de manière considérable sur la hauteur du rotor des grandes éoliennes en conditions extrêmes de stabilité atmosphérique, mais également en fonction de la topographie du site.

Dans la présente norme, le cisaillement du vent et la déviation de la trajectoire du vent ne sont pas étudiés dans le plan horizontal. Par conséquent, la vitesse du vent équivalente de l'énergie, qui correspond à l'énergie cinétique du vent déduite par l'Equation (3), est généralement exprimée par l'équation suivante:

$$V_{\text{eq}} = \left(\frac{1}{A} \int_i (V_i \cos(\varphi_i - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA_i \right)^{1/3} \quad (4)$$

Ici, l'indice i se réfère à la hauteur au sein de la surface du rotor³.

Même si la vitesse horizontale du vent est réputée être le paramètre de vitesse du vent d'influence, sur les sites présentant un écoulement non horizontal significatif (écoulement ascendant ou descendant), une incertitude supplémentaire est associée d'une part à la mesure de la vitesse horizontale du vent et d'autre part à la réponse de l'éolienne.

Sur les sites présentant des cisaillements et des déviations de la trajectoire du vent faibles et homogènes sur la surface du rotor (ainsi que pour les éoliennes équipées de rotors de diamètre réduit dans des conditions d'écoulement du vent potentiellement plus complexes), la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu peut constituer un bon indicateur de l'énergie cinétique que le rotor doit capter. La vitesse du vent à la hauteur du moyeu est la vitesse du vent à partir de laquelle ont été définies les courbes de puissance dans toutes les éditions antérieures de la présente norme. Pour cette raison, la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu est la définition par défaut de la vitesse du vent et doit toujours être mesurée et consignée, même lorsque des mesures plus complètes sont disponibles sur la hauteur du rotor.

² La puissance de l'éolienne semble concorder davantage avec la définition de la vitesse horizontale du vent qu'avec la définition d'une vitesse vectorielle du vent pour une mesure de la vitesse du vent en un point donné à la hauteur du moyeu.

³ Cependant, lorsque la vitesse du vent est mentionnée dans le document, il s'agit par défaut de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, sauf spécification indiquant qu'il s'agit de la vitesse du vent équivalente de l'énergie.

Sur les sites et pendant les saisons où des conditions extrêmes de stabilité atmosphérique sont fréquemment attendues, il est recommandé de procéder à une mesure systématique du cisaillement du vent.

Si le cisaillement et la déviation de la trajectoire du vent ne sont pas mesurés sur la totalité de la hauteur du rotor, une incertitude supplémentaire est associée à la vitesse du vent équivalente. Cette incertitude diminue au fur et à mesure qu'augmente le nombre de hauteurs de mesure de la vitesse et de la direction du vent. Si les mesures se limitent à la hauteur du moyeu et que les parties les plus significatives du rotor n'ont pas fait l'objet d'une mesure du cisaillement du vent, cela entraîne une incertitude dans la détermination de la vitesse du vent équivalente.

Pour les petites éoliennes⁴, pour lesquelles l'influence du cisaillement et de la déviation de la trajectoire du vent est négligeable, la vitesse du vent doit être déterminée en mesurant uniquement la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, sans introduire une incertitude supplémentaire due à l'absence des mesures du cisaillement et de la déviation de la trajectoire du vent.

Pour les éoliennes à axe vertical, pour lesquelles la déviation de la trajectoire du vent n'a aucune influence, la déviation de la trajectoire du vent doit être ignorée.

Les conditions de vent à l'emplacement de l'éolienne d'essai et à l'emplacement de la mesure du vent peuvent varier de manière considérable si ces emplacements se trouvent dans le sillage d'éoliennes; de telles situations doivent donc être exclues de l'essai.

La masse volumique de l'air ρ varie également en fonction de la hauteur du rotor d'une grande éolienne. Néanmoins, cette variation est mineure. Pour la mise en œuvre pratique de la méthode de mesure de performance de puissance, il suffit de définir et de déterminer la masse volumique de l'air seulement à la hauteur du moyeu. La courbe de puissance est normalisée à la masse volumique de l'air moyenne sur le site de mesure pendant la période de mesure ou à la masse volumique de l'air de référence prédéfinie.

Les courbes de puissance sont également influencées par les turbulences sur le site d'essai, lesquelles peuvent varier sur la surface du rotor. Dans la présente norme, seules les turbulences du site à la hauteur du moyeu sont étudiées. Les fortes turbulences augmentent le rayon de courbure de la courbe de puissance au démarrage et au début de la régulation de puissance à la puissance nominale. En revanche, de faibles turbulences accentuent les angles de la courbe de puissance. Les turbulences du site doivent être mesurées et présentées comme un complément à la courbe de puissance. Si cela est nécessaire, les turbulences peuvent être normalisées à une valeur donnée à l'aide de la méthode donnée à l'Annexe M.

En résumé, la courbe de puissance selon la présente norme est une courbe de puissance spécifique au climat, où:

- a) la vitesse du vent en un point donné dans l'espace est définie comme la vitesse horizontale du vent;
- b) la vitesse du vent d'une courbe de puissance est définie comme la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. A cette définition peut s'ajouter la vitesse du vent équivalente définie dans l'Equation (4) en tenant compte du cisaillement du vent vertical et de la déviation de la trajectoire du vent⁵;

⁴ Pour les petites éoliennes, voir l'IEC 61400-2.

⁵ Pour les éoliennes à axe vertical, la déviation de la trajectoire du vent est omise dans l'Equation (3) (en définissant $\varphi_i = \varphi_{\text{hub}}$).

- c) la masse volumique de l'air est mesurée à la hauteur du moyeu, et la courbe de puissance est normalisée à la masse volumique de l'air moyenne du site pendant la période de mesure ou à la masse volumique d'air de référence prédéfinie;
- d) les turbulences sont mesurées à la hauteur du moyeu, et la courbe de puissance est présentée sans normalisation des turbulences;
- e) la courbe de puissance peut être normalisée selon une plage plus large de conditions climatiques (p. ex.: masse volumique de l'air spécifique, intensité des turbulences, cisaillement vertical et déviation de la trajectoire)⁶.

La présente norme fournit toutes les procédures nécessaires pour la mesure, l'étalonnage, la classification, la correction, la normalisation des données et la détermination des incertitudes. Cependant, si tous les paramètres ne sont pas suffisamment mesurés, une incertitude doit être appliquée en raison de l'absence de mesures. Par exemple, cela s'applique à la mesure de la courbe de puissance d'une grande éolienne équipée uniquement d'un capteur de vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Dans ce cas, une incertitude doit être appliquée pour la variabilité du cisaillement et de la déviation de la trajectoire du vent .

Les meilleurs résultats faisant suite à l'application de la norme sont obtenus en mesurant tous les paramètres exigés et en utilisant toutes les procédures adéquates. Néanmoins, si cela n'est pas possible, il existe d'autres options pour les montages de mesure et pour l'utilisation de ces procédures. Ces options sont décrites dans le Tableau 1. Les options se réfèrent à l'utilisation de matériel de mesure du vent, aux normalisations appliquées ainsi qu'aux incertitudes supplémentaires dues à l'absence de mesures.

⁶ La normalisation de la courbe de puissance n'est valide que pour des plages limitées de conditions climatiques parmi les conditions réelles du site.

Tableau 1 – Vue d'ensemble des configurations de mesure du vent pour les mesures de la courbe de puissance qui satisfont aux exigences de la présente norme

Configuration de mesure du vent	1. Mât météorologique à la hauteur du moyeu et dispositif de télédétection à toutes les hauteurs	2. Mât météorologique en dessous de la hauteur du moyeu et dispositif de télédétection à toutes les hauteurs	3. Mât météorologique au-dessus de la hauteur du moyeu	4. Mât météorologique à la hauteur du moyeu
Application type	Grandes éoliennes ⁷ sur terrain plat (voir Annexe B)	Grandes éoliennes sur terrain plat (voir Annexe B)	Petites et grandes éoliennes sur tous types de terrains	Petites et grandes éoliennes sur tous types de terrains
Capteurs de mesure du vent	7.2.3, 7.2.5	7.2.3, 7.2.5	7.2.3, 7.2.4	7.2.3
Procédures de normalisation pour la détermination de la courbe de puissance spécifique au climat	Masse volumique de l'air, cisaillement du vent; 9.1.5 et 9.1.3.4	Masse volumique de l'air, cisaillement du vent; 9.1.5 et 9.1.3.4	Masse volumique de l'air, cisaillement du vent; 9.1.5 et 9.1.3.4	Masse volumique de l'air; 9.1.5
Incertitude supplémentaire due à l'absence de mesures du cisaillement du vent	Aucune incertitude supplémentaire liée à la couverture des hauteurs de mesure; E.11.2.2	Aucune incertitude supplémentaire liée à la couverture des hauteurs de mesure; E.11.2.2	Aucune incertitude supplémentaire liée à la couverture des hauteurs de mesure; E.11.2.2	Incertitude brute supplémentaire pour les grandes éoliennes liée à l'absence de mesures du cisaillement du vent vertical; E.11.2.2
Procédures de normalisation facultatives ⁸	Turbulences, déviation de la trajectoire du vent et angle d'écoulement ascendant; 9.1.6 et 9.1.4	Turbulences, déviation de la trajectoire du vent et angle d'écoulement ascendant; 9.1.6 et 9.1.4	Turbulences, déviation de la trajectoire du vent et angle d'écoulement ascendant; 9.1.6 et 9.1.4 Distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique; 9.1.2, étalonnage du site; Annexe C.	Turbulences et angle d'écoulement ascendant; 9.1.6. Etalonnage du site; Annexe C.

⁷ Voir l'IEC 61400-2 pour la définition des petites et grandes éoliennes.

⁸ Les influences de l'écoulement ascendant influencent la courbe de puissance et peuvent être mesurées avec des anémomètres à ultrasons 3D ou des girouettes d'écoulement ascendant. Si une normalisation de l'angle d'écoulement ascendant est appliquée, il convient de documenter la méthode utilisée (l'incertitude sur l'écoulement ascendant est abordée à l'Annexe E). Toutefois, la présente norme ne décrit aucune procédure spécifique concernant la manière de normaliser l'angle d'écoulement ascendant.

6 Préparation de l'essai de performance

6.1 Généralités

Les conditions d'essai spécifiques concernant la mesure de performance de puissance de l'éolienne doivent être bien définies et documentées dans le rapport d'essai décrit à l'Article 10.

6.2 Eolienne et raccordement électrique

Comme décrit à l'Article 10, l'éolienne et le raccordement électrique doivent être décrits et documentés afin d'identifier de manière unique la configuration spécifique de la machine soumise à l'essai.

6.3 Site d'essai

6.3.1 Généralités

Sur le site d'essai, le matériel de mesure du vent doit être installé dans le voisinage de l'éolienne afin de déterminer la vitesse du vent qui entraîne l'éolienne.

Les caractéristiques de cisaillement du vent et de stabilité atmosphérique du site peuvent avoir une influence significative sur les mesures du vent et sur la performance de puissance réelle de l'éolienne. Un cycle diurne de stabilité atmosphérique est fréquemment observé, caractérisé par une atmosphère stable qui se forme la nuit et par une atmosphère neutre ou instable dans la journée lorsque le soleil réchauffe le sol, ce qui augmente les turbulences et le brassage dans la couche limite. Le cisaillement du vent, la déviation de la trajectoire du vent et les turbulences sont fonction de la stabilité atmosphérique, et affectent les relations entre la vitesse du vent à la hauteur du moyeu et la vitesse du vent équivalente du rotor. Des profils peu habituels peuvent également avoir une influence sur la conversion énergétique de l'éolienne. En outre, les effets de distorsion de l'écoulement peuvent engendrer une différence de la vitesse du vent à l'emplacement de la mesure et à l'emplacement de l'éolienne, en dépit de leur corrélation.

Les sources de distorsion de l'écoulement du vent doivent être évaluées sur le site d'essai afin de:

- a) choisir l'emplacement approprié pour le matériel de mesure du vent;
- b) définir un secteur de mesure approprié;
- c) déterminer si un étalonnage du site est exigé, puis déterminer les corrections d'écoulement appropriées en procédant à une mesure conformément à l'Annexe C;
- d) évaluer l'incertitude due à la distorsion de l'écoulement du vent.

En particulier, les facteurs suivants doivent être pris en compte:

- 1) les variations topographiques et la rugosité;
- 2) les autres éoliennes;
- 3) les obstacles (bâtiments, arbres, etc.).

Le site d'essai doit être documenté de la manière décrite à l'Article 10.

6.3.2 Emplacement du matériel de mesure du vent

Le choix de l'emplacement du matériel de mesure du vent doit faire l'objet d'une attention particulière. Le matériel de mesure du vent ne doit pas être situé trop près de l'éolienne, puisque la vitesse du vent sera influencée devant l'éolienne. Il ne doit pas non plus être situé trop loin de l'éolienne, car la corrélation entre la vitesse du vent et la puissance de sortie électrique en serait réduite. L'instrumentation de mesure de la vitesse du vent et l'éolienne

doivent être placées à une distance comprise entre 2 fois et 4 fois le diamètre du rotor D de l'éolienne. Une distance égale à 2,5 fois le diamètre du rotor D est recommandée. Pour les éoliennes à axe vertical, voir l'Article H.4.

Avant de procéder à l'essai de performance de puissance et afin d'optimiser le choix de l'emplacement du matériel de mesure du vent, il convient de tenir compte de la nécessité d'exclure les mesures de tous les secteurs dans lesquels le matériel de mesure du vent ou l'éolienne seront soumis à une perturbation de l'écoulement.

Dans la plupart des cas, l'emplacement le plus approprié pour le matériel de mesure du vent sera du côté exposé au vent de l'éolienne, dans la direction d'où est censé venir le vent au cours de l'essai. Cependant, il peut parfois être plus approprié de placer le matériel de mesure du vent à côté de l'éolienne dans la mesure où les conditions de vent seront plus semblables, par exemple pour une éolienne située sur une crête.

6.3.3 Secteur de mesure

Le ou les secteurs de mesure doivent exclure les directions présentant des obstacles significatifs et d'autres éoliennes, tant pour les éoliennes à l'essai que pour le matériel de mesure du vent.

Pour l'ensemble des éoliennes et des obstacles significatifs du voisinage, les directions à exclure en raison des effets de sillage doivent être déterminées selon la procédure donnée à l'Annexe A. Les secteurs perturbés à exclure du fait que le matériel de mesure du vent se trouve dans le sillage de l'éolienne à l'essai sont représentés à la Figure 1 pour des distances de $2D$, $2,5D$ et $4D$. La réduction d'un ou de plusieurs secteurs de mesure peut être justifiée par des conditions topographiques spécifiques ou des données de mesure inattendues résultant de directions présentant des structures compliquées. Toutes les raisons de réduire le secteur de mesure doivent être clairement documentées.

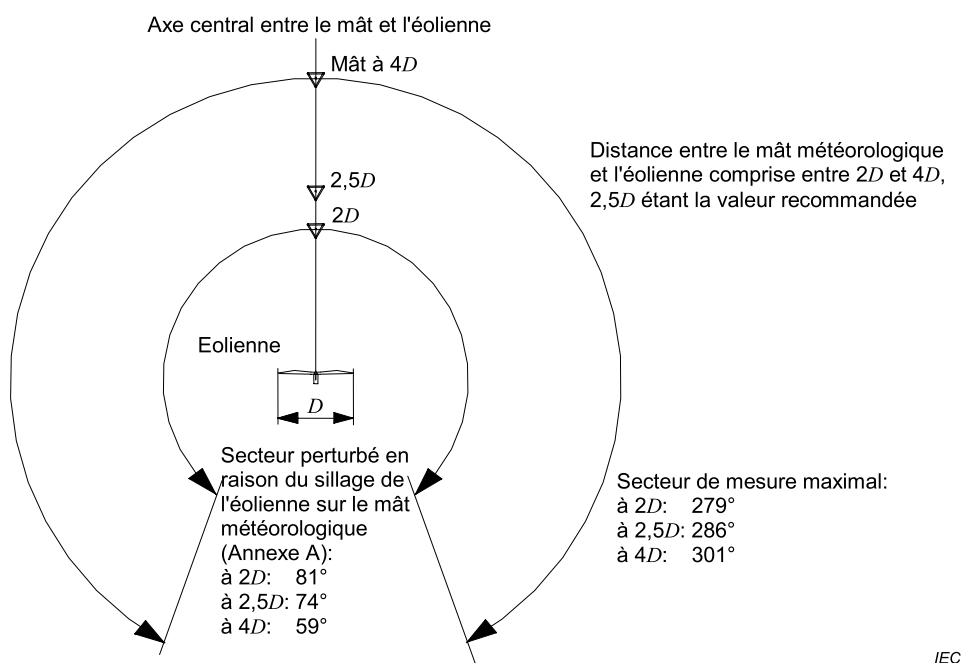


Figure 1 – Exigences de distance entre le matériel de mesure du vent et les secteurs de mesure maximaux admis

6.3.4 Facteurs de correction et incertitude due à la distorsion de l'écoulement résultant de la topographie

Les sources de distorsion de l'écoulement du vent résultant de variations topographiques doivent être évaluées sur le site d'essai. L'évaluation décrite à l'Annexe B doit déterminer si la courbe de puissance peut être mesurée sans procéder à un étalonnage du site. Si les critères de l'Annexe B sont satisfaits, le régime d'écoulement du vent du site ne nécessite pas d'étalonnage du site. Cependant, en prenant pour hypothèse qu'aucune correction d'écoulement n'est nécessaire, l'incertitude appliquée due à la distorsion de l'écoulement du site d'essai doit correspondre au minimum à 2 % de la vitesse du vent mesurée si le matériel de mesure du vent est positionné à une distance comprise entre 2 fois à 3 fois le diamètre du rotor de l'éolienne, et à 3 % ou plus si la distance est comprise entre 3 fois à 4 fois le diamètre du rotor⁹, à moins qu'une preuve tangible puisse démontrer l'estimation d'une incertitude différente.

Si les critères de l'Annexe B ne sont pas respectés ou qu'une incertitude due à la distorsion de l'écoulement du site d'essai moins élevée est souhaitée, un étalonnage du site expérimental doit être réalisé selon l'Annexe C. Les facteurs de correction d'écoulement mesurés pour chaque secteur doivent être utilisés.

7 Matériel d'essai

7.1 Puissance électrique

La puissance électrique nette de l'éolienne doit être mesurée en utilisant un dispositif de mesure de puissance (par exemple, un transducteur de puissance) et être fondée sur des mesures de courant et de tension sur chaque phase.

La classe des transformateurs de courant doit satisfaire aux exigences de l'IEC 61869-2, et la classe des transformateurs de tension, le cas échéant, doit satisfaire aux exigences de l'IEC 61869-3. Ils doivent être de classe 0,5 au moins.

Si le dispositif de mesure de puissance est un transducteur de puissance, la précision doit satisfaire aux exigences de l'IEC 60688 et doit être de classe 0,5 au moins. Si le dispositif de mesure de puissance n'est pas un transducteur de puissance, il convient alors que la précision soit équivalente à celle des transducteurs de puissance de classe 0,5. La plage de fonctionnement du dispositif de mesure de puissance doit être déterminée de manière à mesurer toutes les crêtes de puissance instantanée positives et négatives produites par l'éolienne. A titre indicatif, pour les éoliennes de grande puissance à contrôle actif, il convient de définir la plage complète du dispositif de mesure de puissance de –25 % à +125 % de la puissance assignée de l'éolienne¹⁰. Toutes les données doivent être revues périodiquement pendant l'essai afin de s'assurer que les limites de la plage du dispositif de mesure de puissance n'ont pas été dépassées. Le transducteur de puissance doit être étalonné d'après des normes traçables. Le dispositif de mesure de puissance doit être monté entre l'éolienne et le raccordement électrique afin de s'assurer que seule la puissance électrique active nette (c'est-à-dire, diminuée de la consommation propre) est mesurée. Il doit être indiqué si les mesures sont réalisées côté éolienne ou côté réseau du transformateur.

7.2 Vitesse du vent

7.2.1 Généralités

La vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu (HH, *Hub Height*) seulement correspond à la définition par défaut de la vitesse du vent et doit toujours être utilisée. Elle peut être

⁹ Ces incertitudes ont été déduites à partir d'une analyse WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program, DTU Wind Energy*) d'une courbe gaussienne satisfaisant aux exigences de terrain de l'Annexe B.

¹⁰ Dans les autres cas, une plage plus élevée peut se révéler nécessaire. Ce fait doit être vérifié au cas par cas.

considérée comme le cas limite de la vitesse du vent équivalente du rotor lorsqu'il n'y a qu'une hauteur de mesure et qu'il existe une incertitude supplémentaire due à l'absence de mesures du cisaillement du vent ou du profil de déviation de la trajectoire du vent (voir E.11.2.2). Il est recommandé de compléter la mesure de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu par des mesures du cisaillement du vent dans la moitié inférieure du rotor afin de réduire l'incertitude liée à la vitesse du vent. Pour réduire davantage l'incertitude liée à la vitesse du vent, il convient d'utiliser la vitesse du vent équivalente du rotor (REWS) (voir 9.1.3.2 et Annexe Q) comme variable d'entrée pour la vitesse du vent sur la courbe de puissance.

Les configurations de mesure de la vitesse du vent sont répertoriées au Tableau 2, qui tient compte des limites propres à chaque technologie de mesure en fonction de la classe de complexité du terrain. Les dispositifs de télédétection qui prennent pour hypothèse que le volume analysé présente un écoulement horizontal uniforme limitent l'application de ces technologies à des conditions de terrain non complexe pour les essais de performance de puissance. Ainsi, seules les configurations du Tableau 2 doivent être appliquées.

**Tableau 2 – Configurations de mesure de la vitesse du vent
(X indique une configuration admissible)**

Mesure de la vitesse du vent	HH	HH	REWS	REWS
Type de terrain	Non complexe	Complexe	Non complexe	Complexe
Mât météorologique à la hauteur du moyeu	X	X		
Mât météorologique à la hauteur du moyeu + RSD	X	X	X	
RSD + mât météorologique à une hauteur différente de celle du moyeu	X		X	
Mât météorologique couvrant des hauteurs supérieures à la hauteur du moyeu+ 2/3 R	X	X	X	X

Les différentes configurations de capteurs possibles comprennent les anémomètres montés en tête de mât météorologique, les anémomètres montés latéralement sur des mâts météorologiques et les dispositifs de télédétection. Ces instruments mesurent la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, la vitesse du vent équivalente du rotor, ainsi que le profil de cisaillement du vent. Les Paragraphes 7.2.3 à 7.2.5 décrivent les exigences générales communes concernant les configurations d'anémomètres montés en tête de mât ou latéralement et les configurations de dispositifs de télédétection, tandis que les Paragraphes 7.2.6 à 7.2.8 décrivent les détails spécifiques à la réalisation des mesures à l'aide de ces configurations de capteurs.

7.2.2 Exigences générales concernant les anémomètres montés en tête de mât météorologique

Les exigences suivantes s'appliquent à toutes les applications des anémomètres à coupelles et à ultrasons décrites dans Paragraphes 7.2.3 à 7.2.8.

Le capteur doit satisfaire aux exigences de l'Annexe I concernant les anémomètres à coupelles et à ultrasons. Pour les mesures de performance de puissance, un anémomètre de classe 1,7A ou 1,7C au moins doit être utilisé. En outre, sur un terrain qui exige un étalonnage du site, un anémomètre de classe supérieure à 2,5B, 2,5D ou 1,7S doit être utilisé. Voir Annexe I et Annexe J.

L'anémomètre doit être étalonné au préalable et, si cela est exigé, être à nouveau étalonné après la campagne de mesure (post-étalonnage). Il est obligatoire de vérifier et de documenter que l'étalonnage de l'anémomètre demeure valide tout au long de la période de

mesure. Cela peut être effectué en comparant les résultats de l'étalonnage initial aux résultats du post-étalonnage. A défaut, la comparaison des anémomètres in situ selon l'Annexe K est admise.

Lors de la réalisation d'un post-étalonnage, la différence entre les droites de régression d'étalonnage et de post-étalonnage doit être de l'ordre de $\pm 0,1$ m/s dans la plage de valeurs de 4 m/s à 12 m/s. Seul l'étalonnage effectué avant la campagne de mesure doit être utilisé pour l'essai de performance. L'étalonnage de l'anémomètre doit être réalisé conformément à la procédure donnée à l'Annexe F. Si la différence maximale entre les droites de régression d'étalonnage et de post-étalonnage n'est pas de l'ordre de $\pm 0,1$ m/s dans la plage de valeurs de 4 m/s à 12 m/s, l'incertitude-type de l'étalonnage de l'anémomètre $u_{VS,precal,i}$ doit être augmentée (au moins à sa différence maximale, mais sans dépasser $\pm 0,2$ m/s). Si la différence est supérieure à $\pm 0,2$ m/s, la comparaison des anémomètres in situ selon l'Annexe K doit être utilisée pour identifier le moment auquel s'est produit l'écart dans les données, et les données erronées qui s'ensuivent doivent être rejetées. Si l'essai in situ ne peut pas déterminer le moment auquel a commencé l'écart, la différence de post-étalonnage est ajoutée en tant qu'incertitude.

En guise d'alternative, la procédure d'étalonnage in situ donnée à l'Annexe K doit être utilisée pour vérifier l'intégrité de l'anémomètre tout au long de la période de mesure. Lors de cette procédure, un anémomètre de commande est utilisé pour surveiller l'anémomètre primaire. Lorsqu'un anémomètre à coupelles est utilisé comme anémomètre primaire, un anémomètre à coupelles ou à ultrasons peut être utilisé comme anémomètre de commande. Lorsqu'un anémomètre à ultrasons est utilisé comme anémomètre primaire, l'anémomètre de commande doit être un anémomètre à coupelles. Dans le cas où une courbe de puissance déduite de la REWS est obtenue à partir de mesures réalisées sur un mât météorologique à une hauteur supérieure à celle du moyeu, un anémomètre primaire monté latéralement doit être installé sur le mât à la hauteur du moyeu, avec un anémomètre de commande associé satisfaisant aux exigences de montage de l'Annexe G.

L'incertitude de mesure de la vitesse du vent est déduite à partir de plusieurs sources d'incertitude spécifiées au Tableau D. L'incertitude d'étalonnage doit être déduite à partir de l'Annexe F. L'incertitude due aux caractéristiques d'exploitation doit être déduite selon l'Annexe I consacrée à la classification de l'anémométrie. L'incertitude due aux effets de montage doit être déterminée selon l'Annexe G.

7.2.3 Anémomètres montés en tête de mât

Pour mesurer la vitesse du vent à l'aide d'un anémomètre monté en tête de mât, les exigences de montage données à l'Annexe G doivent être respectées. La hauteur d'installation du capteur au-dessus du niveau du sol¹¹ doit être vérifiée par mesure. La méthode de mesure et son incertitude-type doivent être documentées¹². L'incertitude-type de la mesure de la hauteur du capteur de vitesse du vent au-dessus du niveau estimé du sol doit être inférieure ou égale à 0,2 m. L'anémomètre de commande doit être monté conformément aux exigences données à l'Annexe G.

7.2.4 Anémomètres montés latéralement

Le montage doit satisfaire à l'exigence relative aux anémomètres montés latéralement selon l'Annexe G. La hauteur installée des anémomètres montés latéralement au-dessus du niveau du sol (voir note de bas de page 11) doit être vérifiée par mesure. La méthode de mesure et

¹¹ Afin de déterminer le niveau du sol, une estimation de l'altitude moyenne peut être réalisée sur un rayon de 2 m autour de la base du mât ou sur un rayon de 5 m autour de la base de l'éolienne. Il convient que l'incertitude de mesure de la hauteur du capteur exclue l'incertitude de l'estimation du niveau du sol. En mer, il convient de considérer que le niveau du sol équivaut au niveau moyen de la mer.

¹² La mesure peut être réalisée à l'aide d'un dispositif de mesure avec un étalonnage traçable, comme un théodolite capable de déduire des hauteurs à partir d'une mesure d'angle sur le plan vertical.

son incertitude doivent être documentées. L'incertitude-type de mesure de la hauteur doit être inférieure ou égale à 0,2 m.

La correction des anémomètres montés latéralement pour la distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique est admise et décrite plus en détail en 9.1.2 et à l'Annexe S. Les fondements techniques et l'effet de la correction doivent être documentés. Les flèches doivent toutes avoir la même orientation afin de garantir une distorsion de l'écoulement similaire entre les différentes hauteurs. Il convient que la conception du mât météorologique et celle de la flèche présentent le même effet de distorsion de l'écoulement au niveau du capteur avec une différence maximale admise de distorsion de la vitesse du vent de 1 % entre les différentes hauteurs. Il convient que les dimensions de la section transversale du mât météorologique soient cohérentes pour chaque altitude. En cas de mâts météorologiques autoporteurs pour lesquels la surface de la section transversale est plus large aux altitudes inférieures, il convient de porter une attention particulière à l'application des recommandations données à l'Annexe G. Une autre option consiste à monter un deuxième anémomètre à chaque hauteur de mesure sur une flèche distincte et à limiter le secteur de mesure de telle sorte que les mesures de la vitesse du vent présentent un écart inférieur ou égal à 1 %.

7.2.5 Dispositif de télédétection (RSD)

Les dispositifs de télédétection qui prennent pour hypothèse que le volume analysé présente un écoulement horizontal uniforme limitent l'application de ces technologies à des conditions de terrain non complexe pour les essais de performance de puissance, comme décrit dans l'Annexe B. Le dispositif de télédétection doit être vérifié avant la campagne de mesure ou in situ, conformément à l'Article L.3. Le dispositif de télédétection peut être utilisé pour mesurer la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, le profil de cisaillement du vent, la déviation de la trajectoire du vent et/ou la vitesse du vent équivalente du rotor en procédant à des mesures à plusieurs hauteurs (voir 7.2.8). Dans tous les cas, le dispositif de télédétection doit être comparé parallèlement à un anémomètre monté en tête de mât météorologique à une hauteur supérieure ou égale à la hauteur minimale de l'extrémité inférieure du rotor de l'éolienne ou à une hauteur de 40 m (voir Article L.1). Les exigences relatives aux anémomètres montés en tête de mât sont identiques à celles décrites en 7.2.3.

L'incertitude des mesures de la vitesse du vent des RSD doit être déduite selon l'Annexe L.

7.2.6 Mesure de la vitesse du vent équivalente du rotor

Si la vitesse du vent est mesurée à trois hauteurs ou plus sur le rotor de l'éolienne (voir 7.2.8), la vitesse du vent équivalente du rotor peut être calculée comme indiqué en 9.1.3. Il est à noter qu'il est recommandé d'utiliser plus de trois hauteurs de mesure. Les trois méthodes de mesure de la vitesse du vent équivalente du rotor sont décrites ci-dessous:

- a) Lorsqu'un anémomètre monté en tête de mât à la hauteur du moyeu satisfaisant aux exigences de 7.2.3 est utilisé en conjonction avec un RSD satisfaisant aux exigences de 7.2.5 et que le terrain satisfait aux exigences de l'Annexe B, les mesures de l'anémomètre et du RSD à la hauteur du moyeu sont combinées afin de déterminer la vitesse du vent équivalente du rotor selon 9.1.3.
- b) Lorsqu'un anémomètre monté à une hauteur différente de celle du moyeu, mais satisfaisant aux exigences relatives aux anémomètres montés en tête de mât de 7.2.3, est utilisé en conjonction avec un RSD satisfaisant aux exigences de 7.2.5 et que le terrain satisfait aux exigences de l'Annexe B, les mesures du RSD sont utilisées directement afin de déterminer la vitesse du vent équivalente du rotor selon 9.1.3.
- c) Lorsqu'un mât météorologique situé à une hauteur supérieure à celle du moyeu est utilisé en conjonction avec des anémomètres montés latéralement répartis sur la hauteur du rotor, l'un d'eux se situant à la hauteur du moyeu, les mesures de la vitesse du vent des anémomètres montés latéralement peuvent être utilisées directement afin de mesurer la vitesse du vent équivalente du rotor selon 9.1.3.

7.2.7 Mesure de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu

Les trois méthodes de mesure de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu sont décrites ci-dessous:

- a) Lorsqu'un mât météorologique situé à la hauteur du moyeu est utilisé, les mesures de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu doivent satisfaire aux exigences décrites en 7.2.3.
- b) Si le terrain satisfait aux exigences de l'Annexe B, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu peut être mesurée à l'aide d'un RSD satisfaisant aux exigences de 7.2.5, en particulier à l'exigence visant à comparer simultanément le RSD à un anémomètre monté en tête de mât.
- c) Un mât météorologique situé à une hauteur supérieure à celle du moyeu peut être utilisé afin de mieux capturer les vitesses du vent sur la surface du rotor. Dans ce cas, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu doit être mesurée à l'aide d'un capteur monté latéralement sur une flèche satisfaisant aux exigences décrites en 7.2.4.

Pour la définition de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, le fait que le cisaillement du vent vertical ou la déviation de la trajectoire du vent sur le rotor de l'éolienne ne sont pas connus doit être pris en compte en ajoutant un terme d'incertitude conformément à l'Annexe E, basé sur les estimations ou les mesures du cisaillement du vent ou de la déviation de la trajectoire du vent. Lorsque seule une mesure de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est disponible, une estimation du cisaillement du vent ou de la déviation de la trajectoire du vent en fonction des caractéristiques du site (p. ex.: rugosité), d'une mesure antérieure ou d'une modélisation du site (p. ex.: lors d'une campagne d'évaluation des ressources) doit être utilisée comme entrée pour l'analyse d'incertitude. Lorsque la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est déterminée à l'aide d'un RSD ou d'un mât météorologique situé à une hauteur supérieure à celle du moyeu et équipé d'instruments de mesure montés latéralement sur le rotor, ou lorsque des instruments montés latéralement à une hauteur inférieure à celle du moyeu et satisfaisant aux exigences minimales décrites en 7.2.8 sont utilisés, le cisaillement du vent ou la déviation de la trajectoire du vent déduits à l'aide du RSD ou des instruments montés latéralement doivent être utilisés comme valeur d'entrée pour l'évaluation de l'incertitude.

7.2.8 Mesures du cisaillement du vent

Lorsque des mesures de la vitesse du vent sont disponibles sur une plage de hauteurs, le cisaillement du vent doit être mesuré et utilisé pour la détermination de la vitesse du vent équivalente du rotor ou de l'exposant de cisaillement du vent.

Les mesures du cisaillement du vent doivent être réalisées en utilisant soit des anémomètres montés latéralement (voir 7.2.4), soit un instrument de télédétection seul (voir 7.2.5). Des spécifications supplémentaires pour la mesure du cisaillement du vent à l'aide d'instruments de télédétection ou pour les mesures à l'aide de mâts météorologiques sont respectivement données à l'Annexe L et à l'Annexe G.

La mesure de la vitesse du vent équivalente du rotor doit inclure les mesures de la vitesse du vent à une hauteur supérieure à celle du moyeu. Pour appliquer une correction du cisaillement du vent fondée sur une mesure, au moins trois mesures de la vitesse du vent réparties sur la surface balayée par le rotor doivent être réalisées. Cependant, afin de réduire le plus possible l'incertitude de la vitesse du vent, il est recommandé de prévoir le plus grand nombre possible de hauteurs de mesure. Il convient de répartir les hauteurs de mesure de manière symétrique autour de la hauteur du moyeu et de façon régulière sur la plage verticale de la surface balayée par le rotor.

Les hauteurs de mesure doivent inclure au moins les hauteurs suivantes:

- a) hauteur du moyeu $\pm 1,0 \%$;
- b) hauteur entre $H - R$ et $H - 2/3R$;
- c) hauteur entre $H + 2/3R$ et $H + R$,

où H est la hauteur du moyeu de l'éolienne et R le rayon de la surface balayée par le rotor (voir Figure 2).

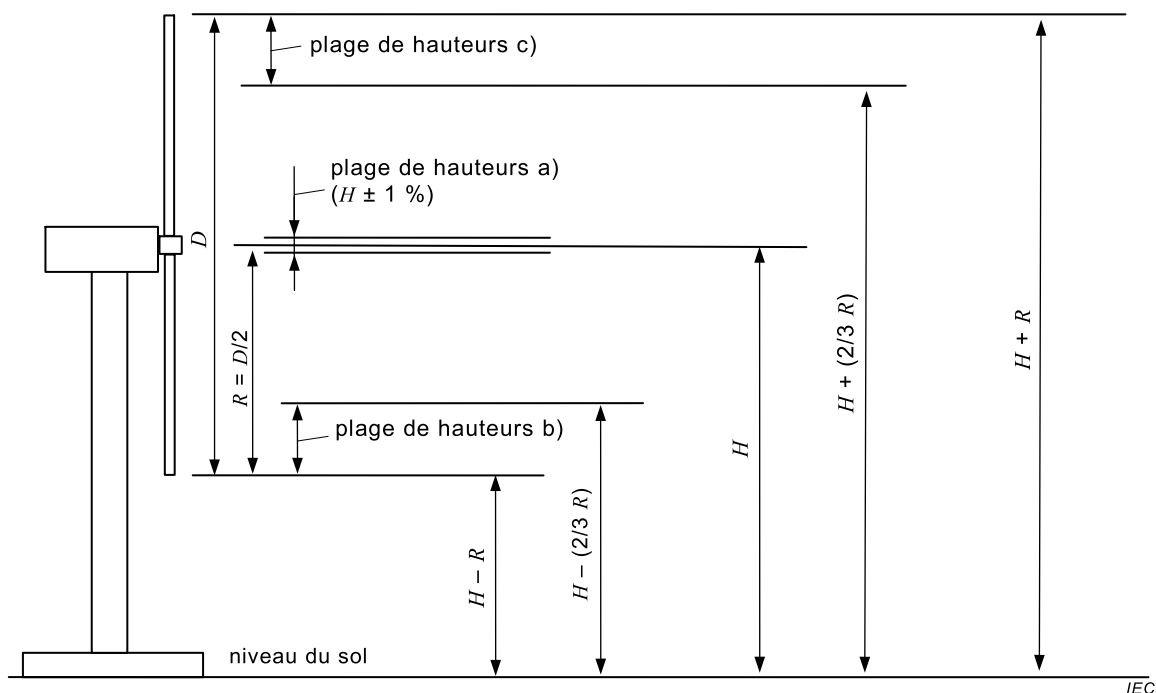


Figure 2 – Hauteurs de mesure du cisaillement du vent appropriées pour la mesure de la vitesse du vent équivalente du rotor

Si le mât météorologique se situe à la hauteur du moyeu ou légèrement au-dessus, aucune mesure de la vitesse du vent à une hauteur supérieure à celle du moyeu ne peut être disponible pour la mesure du cisaillement du vent. Dans ce cas, les mesures utilisées pour déduire le cisaillement du vent doivent inclure au moins les hauteurs suivantes:

- un anémomètre monté latéralement le plus proche possible de la hauteur du moyeu satisfaisant aux exigences de l'Annexe G concernant la distance de séparation par rapport à l'anémomètre monté en tête de mât;
- la distance entre $H - R$ et $H - 2/3 R$ satisfaisant aux exigences de l'Annexe G concernant les anémomètres montés latéralement.

où H est la hauteur du moyeu de l'éolienne et R le rayon de la surface balayée par le rotor (voir Figure 3).

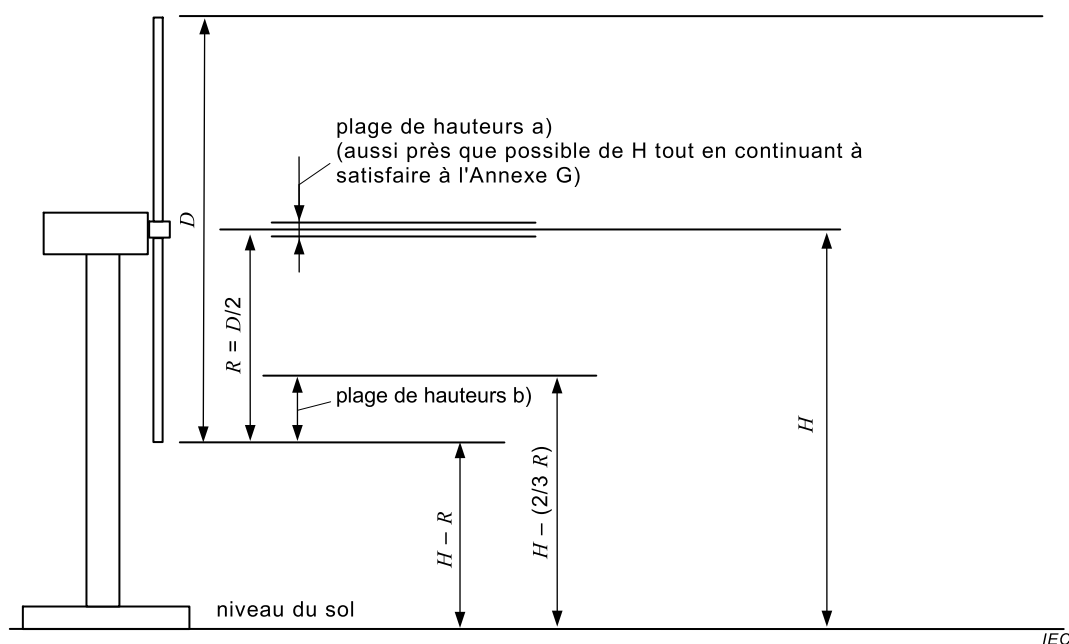


Figure 3 – Hauteurs de mesure du cisaillement du vent lorsqu'aucune mesure de la vitesse du vent à une hauteur supérieure à celle du moyeu n'est disponible (uniquement pour la détermination de l'exposant de cisaillement du vent)

7.3 Direction du vent

Les mesures de la direction du vent sont utilisées comme entrée pour l'étalonnage du site, le filtrage des données vers le secteur de direction valide et la détermination de la déviation de la trajectoire du vent. La direction du vent doit être mesurée à l'aide d'un capteur de direction du vent. Il peut s'agir d'une girouette, d'un anémomètre à ultrasons 2D ou 3D, ou d'un RSD. Un anémomètre à ultrasons doit être utilisé en conjonction avec une girouette conventionnelle, à des fins de contrôle. Si un RSD est utilisé, il convient de le soumettre à un essai de vérification de la direction du vent selon l'Annexe L.

La direction horizontale instantanée du vent doit être déterminée et moyennée sur une période de 10 min. Le moyennage vectoriel (moyennage des composantes cosinus et sinus des valeurs de directions instantanées du vent en prenant l'arc tangent des valeurs moyennes et ajusté à l'échelle allant de 0° à 360°) est une méthode permettant de déduire la direction moyenne du vent. Une autre méthode consiste à élargir l'échelle de direction du vent à des valeurs supérieures à 360° et à calculer la moyenne sur une période de 10 min, puis à ajuster la valeur moyenne à la plage allant de 0° à 360° . Les données mesurées dans la zone morte d'une girouette, correspondant en règle générale à l'indicateur du nord du corps du capteur de direction du vent, ne sont pas définies (circuit ouvert ou court-circuit) et doivent être exclues. L'incertitude-type composée sur l'étalonnage, l'exploitation et l'orientation pour la mesure de la direction du vent doit être inférieure à 5° . Le capteur de direction du vent doit être étalonné. L'Annexe N fournit des lignes directrices à ce sujet.

7.4 Masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air doit être déduite à partir de la mesure de la température de l'air, de la pression atmosphérique et de l'humidité relative. A défaut d'une mesure de l'humidité, il est admis d'appliquer une valeur hypothétique de 50 % d'humidité relative. La masse volumique de l'air doit être calculée à l'aide de l'Equation (12) donnée en 9.1.5.

Le capteur de température de l'air doit être monté dans un rayon de 10 m de la hauteur du moyeu afin de représenter la température de l'air au niveau de l'axe central du rotor de l'éolienne. L'Annexe G définit les exigences de montage du capteur de température lorsqu'un mât météorologique dont la hauteur est inférieure à celle du moyeu est utilisé.

Il convient de monter le capteur de pression atmosphérique dans un rayon de 10 m de la hauteur du moyeu afin de représenter la pression atmosphérique au niveau de l'axe central du rotor de l'éolienne. Les mesures de la pression atmosphérique doivent toujours être corrigées à la hauteur du moyeu appropriée, conformément à l'ISO 2533.

Il convient de monter le capteur d'humidité dans un rayon de 10 m de la hauteur du moyeu afin de représenter l'humidité au niveau de l'axe central du rotor de l'éolienne.

7.5 Vitesse de rotation et angle de pas

Il convient de mesurer la vitesse de rotation et l'angle de pas tout au long de l'essai si nécessaire, par exemple si les mesures doivent être appliquées en association avec des essais de bruit acoustique. Si ces valeurs sont mesurées, les mesures doivent être consignées conformément à l'Article 10.

7.6 Condition des pales

La condition des pales peut influencer la courbe de puissance, plus particulièrement dans le cas des éoliennes à régulation par décrochage. Il peut être utile de comprendre les caractéristiques de l'éolienne afin de surveiller les facteurs qui affectent la condition des pales, notamment les précipitations, le givrage et l'accumulation d'insectes et de boue.

7.7 Système de contrôle de l'éolienne

Des signaux d'état en nombre suffisant doivent être identifiés, vérifiés et surveillés afin de pouvoir appliquer les critères de rejet donnés en 8.4. Ces paramètres peuvent être obtenus à partir du système d'acquisition de données du système de contrôle de l'éolienne¹³. La définition de chaque signal d'état doit être consignée.

7.8 Système d'acquisition de données

Un système numérique d'acquisition de données ayant une fréquence d'échantillonnage par canal d'au moins 1 Hz doit être utilisé pour recueillir les mesures et stocker les données échantillonnées ou les statistiques relatives aux ensembles de données décrits en 8.3.

L'étalonnage et la précision de la chaîne du système d'acquisition de données (transmission, conditionnement du signal et enregistrement des données) doivent être vérifiés en injectant des signaux connus à partir d'une source traçable et étalonnée aux extrémités des transducteurs et en comparant ces entrées aux valeurs enregistrées. A titre de ligne directrice, il convient que l'incertitude du système d'acquisition de données soit négligeable par rapport à l'incertitude des capteurs.

8 Procédure de mesure

8.1 Généralités

L'objectif de la procédure de mesure est de collecter des données qui satisfont à un ensemble de critères clairement définis pour s'assurer que la quantité et la qualité des données suffisent pour déterminer avec précision les caractéristiques de performance de puissance de l'éolienne. La procédure de mesure doit être documentée, comme décrit à l'Article 10, de façon à ce que chaque étape du mode opératoire et chaque condition d'essai puisse être révisée et, si nécessaire, répétée.

¹³ Un signal d'état de démarrage du générateur peut être utilisé pour vérifier l'hystérésis de la coupure dans l'algorithme de contrôle.

La précision des mesures doit être exprimée en termes d'incertitude-type, comme décrit à l'Annexe D. Pendant la période de mesure, il convient de valider régulièrement les données pour garantir une haute qualité. Des journaux d'essai doivent être tenus à jour afin de documenter tous les événements importants pendant l'essai de performance de puissance.

8.2 Exploitation de l'éolienne

Pendant la période de mesure, l'éolienne doit être en fonctionnement normal conformément aux prescriptions du manuel d'exploitation de l'éolienne et la configuration de la machine ne doit pas être modifiée. L'état d'exploitation de l'éolienne doit être consigné comme décrit à l'Article 10. Une maintenance normale de l'éolienne doit être assurée tout au long de la période de mesure, mais ces travaux doivent être notés dans le journal d'essai. En particulier, toutes les actions de maintenance spéciale (par exemple, un lavage fréquent des pales) destinées à garantir une bonne performance pendant l'essai doivent être consignées. Il convient d'éviter de procéder à de telles actions de maintenance spéciale.

8.3 Collecte des données

Les données doivent être collectées en continu à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz ou plus. La température de l'air, la pression atmosphérique, l'humidité et les précipitations, si ces caractéristiques sont mesurées, peuvent être échantillonnées moins souvent, mais au moins une fois par minute.

Le système d'acquisition de données doit stocker les données échantillonnées ou bien les statistiques relatives aux ensembles de données comme suit:

- a) la valeur moyenne;
- b) l'écart-type;
- c) la valeur maximale;
- d) la valeur minimale.

Les ensembles de données choisis doivent être basés sur des périodes de 10 min déduites à partir de données mesurées de façon continue. Les données doivent être collectées jusqu'à ce que les exigences définies en 8.5 soient satisfaites.

8.4 Rejet des données

Pour s'assurer que seules les données obtenues lors de l'exploitation normale de l'éolienne sont utilisées pour l'analyse, mais aussi que les données ne sont pas corrompues, les ensembles de données doivent être exclus de la base de données dans les situations suivantes:

- a) les conditions externes autres que la vitesse du vent sont en dehors de la plage de fonctionnement de l'éolienne;
- b) l'éolienne ne peut pas fonctionner en raison d'un état de défaut;
- c) l'éolienne est arrêtée manuellement ou dans un mode d'exploitation d'essai ou de maintenance;
- d) le matériel de mesure est défaillant ou dégradé (par exemple, à cause du givrage);
- e) la direction du vent est en dehors du ou des secteurs de mesure définis en 6.3.3;
- f) les directions du vent sont en dehors des secteurs valides (complets) d'étalonnage du site;
- g) toute condition atmosphérique particulière filtrée pendant l'étalonnage du site doit l'être également pendant l'essai de courbe de puissance.

Tout autre critère de rejet doit être clairement consigné.

L'effet sur la courbe de puissance d'une large boucle d'hystérésis dans l'algorithme de contrôle de coupure peut être considérable. Cet effet ne doit pas être inclus dans la courbe de puissance. Quant à tous les ensembles de données correspondant au moment où l'éolienne a arrêté de produire de la puissance en raison d'une coupure due à une vitesse élevée du vent, ils doivent être exclus. Si le comportement de coupure a été atteint pendant la période de mesure, les mesures peuvent être présentées dans une base de données spéciale contenant tous les points de données de la base de données. La courbe de puissance doit refléter l'effet de l'hystérésis dans l'algorithme de contrôle du démarrage, mais aussi l'effet des pertes parasites en dessous de la vitesse de démarrage. L'hystérésis de coupure affecte les tranches de vitesse du vent les plus élevées; le fait de l'ignorer peut donc conduire à une surestimation de la production d'énergie, en particulier dans des scénarios présentant des vitesses de vent annuelles plus élevées.

Des sous-ensembles de la base de données collectés dans des conditions d'exploitation particulières (par exemple, forte rugosité des pales due à la poussière, sel, insectes, givrage ou si les conditions de raccordement varient de manière considérable) ou des conditions atmosphériques particulières (par exemple, précipitations, cisaillement du vent) qui se produisent pendant la période de mesure peuvent être choisis comme bases de données spéciales.

8.5 Base de données

Après normalisation des données (voir 9.1), les ensembles de données choisis doivent être triés selon la procédure de la "méthode des tranches" (voir 9.2). La plage de vitesses du vent doit être divisée en tranches contiguës de 0,5 m/s, centrées sur des multiples de 0,5 m/s. Les ensembles de données choisis doivent au moins couvrir une plage de vitesses du vent comprise entre 1 m/s en dessous de la vitesse de démarrage et 1,5 fois la vitesse du vent à 85 % de la puissance assignée de l'éolienne. A défaut, la plage de vitesses du vent doit s'étendre entre 1 m/s en dessous de la vitesse de démarrage et la vitesse du vent à laquelle l'"AEP mesurée" est supérieure ou égale à 95 % de l'"AEP extrapolée" (voir 9.3), l'"AEP mesurée" et l'"AEP extrapolée" étant déterminées sur la base des définitions cohérentes appropriées de la vitesse du vent (c'est-à-dire, la distribution des vitesses du vent et la courbe de puissance déduite à partir de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, ainsi que, lorsque la REWS est déduite, la distribution des vitesses du vent et la courbe de puissance déduite à partir de la REWS). Pour les éoliennes avec contrôle de pas actif, la courbe de puissance peut être considérée comme complète lorsque la puissance assignée a été atteinte, que la puissance moyenne ne varie pas de plus de 0,5 % de la puissance ou de 5 kW (la valeur retenue étant la plus élevée des deux) pendant trois tranches consécutives de vitesse du vent, et que la puissance ne tend pas à augmenter sur la moyenne de ces trois tranches. Le rapport doit indiquer lequel des trois critères de plage de vitesses du vent a été utilisé.

La base de données doit être considérée comme complète lorsqu'elle satisfait aux critères suivants:

- a) chaque tranche comporte un minimum de 30 min de données échantillonnées;
- b) la base de données comporte un minimum de 180 h de données échantillonnées.

Dans l'éventualité où une tranche incomplète empêcherait l'achèvement de l'essai, cette valeur de tranche peut être estimée par interpolation linéaire à partir des deux tranches complètes adjacentes.

La base de données doit être présentée dans le rapport d'essai décrit à l'Article 10.

9 Résultats déduits

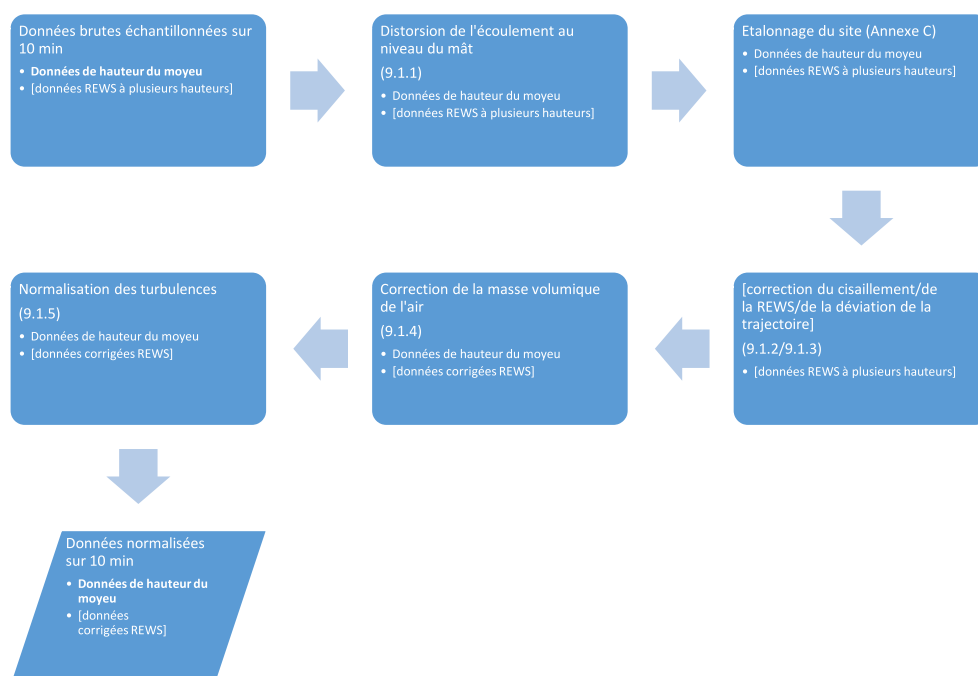
9.1 Normalisation des données

9.1.1 Généralités

Dans les paragraphes suivants, trois méthodes de normalisation sont décrites pour les principaux facteurs atmosphériques influençant les résultats de la courbe de puissance: la masse volumique de l'air, le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences.

L'objectif de ces normalisations est d'améliorer la précision des résultats au moyen de formulations concrètes pour chaque variable. Cela permettra dans une certaine mesure de comparer les résultats de différents ensembles de données sur une échelle similaire.

Il convient d'appliquer les différentes normalisations conformément à l'organigramme de la Figure 4.



IEC

Figure 4 – Processus d'application des différentes normalisations¹⁴

9.1.2 Correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique par les anémomètres montés latéralement

Concernant la distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique, une correction des vitesses du vent par les anémomètres montés latéralement est admise (l'exigence de l'Annexe G pour un maximum de 1 % de distorsion de l'écoulement du mât météorologique avant application de la correction étant toujours valable). Toute méthode de correction doit être documentée et consignée conformément aux exigences de l'Article 10.

¹⁴ Lorsque les mesures facultatives de la REWS sont disponibles, les données de REWS suivent une trajectoire de normalisation parallèle aux normalisations des données de hauteur du moyeu par défaut, représentées par les termes entre crochets. La normalisation des données REWS est réalisée séparément à chaque hauteur de mesure pour toutes les étapes de normalisation, jusqu'à l'étape à laquelle les résultats de chaque hauteur sont combinés dans la correction du cisaillement/de la REWS/de la déviation de la trajectoire. Une seule valeur corrigée de REWS est déduite pour chaque point de données de 10 min à chaque étape suivante, parallèlement aux corrections appliquées à chaque point de données de hauteur du moyeu.

L'impact de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique sur la mesure du cisaillement du vent peut être diminué le plus possible en réduisant le secteur de mesure lorsque le niveau de distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique est inférieur à une limite donnée. Les fondements techniques d'une telle réduction de la largeur du secteur doivent être documentés. L'Annexe S donne une méthode possible de détermination de la distorsion de l'écoulement pour un mât en treillis.

9.1.3 Correction du cisaillement du vent (lorsque des mesures de REWS sont disponibles)

9.1.3.1 Généralités

Si la vitesse du vent sur la surface du rotor de l'éolienne est constante, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu sera représentative de la vitesse du vent sur le rotor de l'éolienne et l'utilisation de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu sera justifiée. Néanmoins, l'hypothèse selon laquelle la vitesse du vent en un point (par exemple à la hauteur du moyeu) représente la vitesse du vent sur la surface du rotor de l'éolienne peut ne pas être représentative pour les grandes éoliennes. C'est pourquoi il est nécessaire d'introduire des corrections pour tenir compte de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, ainsi que des variations introduites par le cisaillement du vent sur le rotor de l'éolienne. Trois grandeurs sont définies ci-dessous:

- a) la vitesse du vent équivalente du rotor;
- b) le facteur de correction du cisaillement du vent;
- c) la vitesse du vent corrigée du cisaillement du vent.

Le facteur de correction du cisaillement du vent peut être utilisé pour déduire une courbe de puissance spécifique à un climat, comme décrit à l'Annexe P. Cette correction est toutefois fondée sur l'hypothèse qu'une éolienne est capable de convertir toute l'énergie cinétique disponible.

9.1.3.2 Vitesse du vent équivalente du rotor

La vitesse du vent équivalente du rotor est la vitesse du vent correspondant au flux d'énergie cinétique qui traverse la surface balayée par le rotor, en tenant compte du cisaillement du vent vertical. Lorsque la vitesse du vent est disponible pour au moins trois hauteurs de mesure (voir 7.2.6), la vitesse du vent équivalente du rotor est définie comme suit:

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^{n_h} v_i^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad (5)$$

où

- n_h est le nombre de hauteurs de mesure disponibles ($n_h \geq 3$);
- v_i est la vitesse du vent mesurée à la hauteur i ;
- A est la surface totale balayée par le rotor (c'est-à-dire πR^2 , R étant le rayon);
- A_i est la surface du i^{e} segment, c'est-à-dire le segment pour lequel la vitesse du vent v_i est représentative, déduite à partir de l'Equation (6).

Les segments (avec les surfaces A_i) doivent être choisis de telle manière que la ligne de séparation horizontale entre deux segments se trouve au milieu des deux points de mesure. Les surfaces de segments sont ensuite déduites à l'aide de l'Equation (6):

$$A_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} c(z) dz = g(z_{i+1}) - g(z_i) \quad (6)$$

où

z_i est la hauteur de la i^{e} ligne de séparation de segment ($H-R < z_i < H+R$), numérotée dans le même ordre que v_i (de haut en bas ou de bas en haut).

La largeur du rotor à la hauteur z est:

$$\ell(z) = 2\sqrt{R^2 - (z - H)^2} \quad (7)$$

où

R est le rayon du rotor;

H est la hauteur du moyeu.

La fonction intégrée est:

$$g(z) = (z - H)\sqrt{R^2 - (z - H)^2} + R^2 \arctan\left(\frac{z - H}{\sqrt{R^2 - (z - H)^2}}\right) \quad (8)$$

Exemple de calcul REWS pour un profil de vitesse du vent sur 10 min

Cet exemple prend pour hypothèse une éolienne présentant une hauteur du moyeu de 80 m et un diamètre de rotor de 100 m. La vitesse du vent a été mesurée à 5 hauteurs à l'aide d'un mât météorologique. Si les hauteurs avaient pu être choisies, elles auraient été idéalement réparties de façon régulière (40 m, 60 m, 80 m, 100 m et 120 m). Cet exemple représente un cas dans lequel les hauteurs ont été déterminées indépendamment de l'objectif d'évaluation de la REWS. Les limites du segment ont été définies au milieu de deux mesures consécutives. La REWS obtenue est égale à 9,38 m/s (voir Tableau 3).

Tableau 3 – Exemple de calcul de REWS

Hauteurs de mesure [m]	Vitesse du vent [m/s]	Pondération du segment * [%]	Hauteur limite inférieure du segment (z_i) [m]	Hauteur limite supérieure du segment (z_{i+1}) [m]	Hauteur du segment [m]
116	11,46	16,31	108	130	22
100	10,43	21,04	90	108	18
80	9,24	25,29	70	90	20
60	7,81	23,12	50	70	20
40	6,05	14,24	30	50	20
* La pondération du segment est définie comme le rapport entre la surface du segment et la surface totale balayée par le rotor.					

9.1.3.3 Facteur de correction du cisaillement du vent

9.1.3.3.1 Cas 1: Mât météorologique à hauteur du moyeu avec dispositif de télédétection ou dispositif de télédétection avec mât météorologique court (hauteur inférieure à celle du moyeu)

Un facteur de correction du cisaillement du vent mesuré à l'aide d'un dispositif de télédétection est défini comme le rapport de la vitesse du vent équivalente du rotor par rapport à la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu selon l'Equation (9):

$$f_{r,RSD} = v_{eq,RSD} / v_{h,RSD} \quad (9)$$

où

$v_{eq,RSD}$ est la vitesse du vent équivalente du rotor mesurée à l'aide du dispositif de télédétection, selon l'Equation (5);

$v_{h,RSD}$ est la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu à l'aide du dispositif de télédétection.

9.1.3.3.2 Cas 2: Mât météorologique au-dessus de la hauteur du moyeu

Le facteur de correction du cisaillement du vent mesuré à l'aide d'un mât météorologique est défini comme le rapport de la vitesse du vent équivalente du rotor par rapport à la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu selon l'Equation (10)¹⁵:

$$f_{r,MM} = v_{eq,MM} / v_{h,MM} \quad (10)$$

où

$v_{eq,MM}$ est la vitesse du vent équivalente du rotor mesurée par les anémomètres sur le mât météorologique, selon l'Equation (5);

$v_{h,MM}$ est la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre à la hauteur du moyeu.

9.1.3.4 Correction du cisaillement du vent

Si la vitesse du vent à la hauteur du moyeu et le cisaillement du vent sont mesurés à l'aide du même type de WME, la vitesse du vent équivalente du rotor est calculée selon l'Equation (5).

Si la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est mesurée à l'aide d'un anémomètre monté sur un mât météorologique et que le cisaillement du vent est mesuré à l'aide d'un RSD, la vitesse du vent équivalente du rotor final est calculée selon l'Equation (11):

$$v_{eq,final} = f_{r,RSD} v_{h,MM} \quad (11)$$

9.1.4 Correction de la déviation de la trajectoire du vent

Comme expliqué à l'Annexe Q, le changement de direction du vent sur la plage de hauteurs du rotor (déviations de la trajectoire du vent) peut avoir un impact significatif sur la puissance de sortie de l'éolienne. Dans le cas des rotors de grandes éoliennes, il est recommandé d'appliquer la définition étendue de la vitesse du vent équivalente, en y incluant la déviation de la trajectoire du vent.

9.1.5 Normalisation de la masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air doit être déterminée à partir de la mesure de la température de l'air, de la pression atmosphérique et de l'humidité relative, selon l'Equation (12):

$$\rho_{10min} = \frac{1}{T_{10min}} \left(\frac{B_{10min}}{R_0} - \Phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (12)$$

où

ρ_{10min} est la masse volumique de l'air moyennée déduite sur une période de 10 min;

T_{10min} est la température absolue de l'air moyennée sur une période de 10 min [K];

B_{10min} est la pression atmosphérique corrigée à la hauteur du moyeu moyennée sur une période de 10 min [Pa];

¹⁵ Il est à noter que $f_{r,MM}$ est utilisé aux fins du rapport seulement.

R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK];

Φ est l'humidité relative (plage de 0 % à 100 %);

R_w est la constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5) [J/kgK];

P_w est la pression de vapeur égale à $0,000\,020\,5 \exp(0,0631\,846\,T_{10\min})$ [Pa];

La pression de vapeur P_w dépend de la température moyenne de l'air sur une période de 10 min.

Les ensembles de données choisis doivent être normalisés à au moins une masse volumique de l'air de référence. La masse volumique de l'air de référence doit correspondre à la moyenne de la masse volumique de l'air mesurée pour l'ensemble de données valide collecté sur le site pendant la période d'essai (voir 8.4) ou, à défaut, à une masse volumique de l'air nominale prédéfinie pour le site. La masse volumique de l'air moyenne mesurée doit être arrondie au $0,01\text{ kg/m}^3$ le plus proche et être consignée conformément à l'Article 10.

Pour une éolienne à régulation par décrochage avec pas de pale constant et vitesse de rotation constante, la normalisation des données doit être appliquée à la puissance de sortie mesurée selon l'Equation (13):

$$P_n = P_{10\min} \left(\frac{\rho_0}{\rho_{10\min}} \right) \quad (13)$$

où

P_n est la puissance de sortie normalisée;

$P_{10\min}$ est la puissance moyennée sur une période de 10 min;

ρ_0 est la masse volumique de l'air de référence;

$\rho_{10\min}$ est la masse volumique de l'air déduite selon l'Equation (12) moyennée sur une période de 10 min.

Pour une éolienne avec contrôle de la puissance active, la normalisation doit être appliquée à la vitesse du vent selon l'Equation (14):

$$V_n = V_{10\min} \left(\frac{\rho_{10\min}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (14)$$

où

V_n est la vitesse normalisée du vent;

$V_{10\min}$ est la vitesse du vent moyennée sur une période de 10 min.

9.1.6 Normalisation des turbulences

Les mesures de la courbe de puissance de l'éolienne sont influencées par l'intensité des turbulences. Une grande partie de l'effet de l'intensité des turbulences est causée par le moyennage de la puissance de sortie mesurée et la vitesse du vent mesurée sur des périodes de 10 min. Il est recommandé d'éliminer cet effet des mesures en normalisant les données de courbe de puissance à l'intensité des turbulences de référence conformément à l'Annexe M. L'intensité des turbulences de référence doit être définie avant l'essai de courbe de puissance. Elle peut être définie comme une fonction de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Sauf indication contraire, une intensité des turbulences de référence de 10 % doit être appliquée. L'incertitude relative à la normalisation des turbulences doit être prise en compte. Si aucune normalisation des turbulences n'est appliquée aux données de courbe de puissance, l'incertitude sur la courbe de puissance due aux effets des turbulences doit être

estimée. Il est recommandé d'utiliser la méthode de calcul de l'incertitude décrite à l'Annexe M¹⁶.

9.2 Détermination de la courbe de puissance mesurée

La courbe de puissance doit être déterminée en fonction de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu et, lorsqu'elle est mesurée, de la vitesse du vent équivalente du rotor. Toutefois, il convient de se rappeler que l'incertitude dans une courbe de puissance déduite à partir de mesures à hauteur du moyeu seulement est plus élevée en raison du fait qu'aucun autre paramètre influant sur les conditions du vent n'est connu. Pour tenir compte du cisaillement du vent vertical, de la déviation de la trajectoire du vent et de l'intensité des turbulences, mais aussi pour réduire l'incertitude de mesure de la courbe de puissance, il est recommandé de considérer la vitesse du vent équivalente du rotor comme la vitesse du vent représentative et la puissance de sortie normalisée des turbulences conforme à l'Annexe M comme la puissance de sortie pertinente. La dérivation des courbes de puissance à partir de la vitesse du vent normalisée pour un profil de cisaillement du vent spécifique (voir Annexe P) et la puissance de sortie normalisée des turbulences sont des options recommandées lorsqu'une comparaison entre différentes courbes de puissance est souhaitée ou que les courbes de puissance sont appliquées pour l'évaluation des ressources éoliennes.

Pour indiquer des moyennes sur des périodes de 10 min, il convient d'ajouter un indice j supplémentaire aux vitesses de vent respectives.

La courbe de puissance mesurée est déterminée en appliquant la "méthode des tranches" aux ensembles de données normalisés, en utilisant des tranches de vitesse du vent de 0,5 m/s et en calculant les valeurs moyennes de la vitesse normalisée du vent et de la puissance de sortie normalisée pour chaque tranche de vitesse du vent, selon les Equations (15) et (16):

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (15)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (16)$$

où

- V_i est la vitesse du vent normalisée et moyennée dans la tranche i ;
- $V_{n,i,j}$ est la vitesse du vent normalisée de l'ensemble de données j dans la tranche i ;
- P_i est la puissance de sortie normalisée et moyennée dans la tranche i ;
- $P_{n,i,j}$ est la puissance de sortie normalisée de l'ensemble de données j dans la tranche i ;
- N_i est le nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche i .

La courbe de puissance mesurée doit être présentée et décrite comme indiqué à l'Article 10. Lorsque des courbes de puissance de la REWS sont mesurées, la courbe de puissance de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu doit également être présentée.

9.3 Production annuelle d'énergie (AEP)

L'AEP doit être calculée de deux manières, l'une nommée "AEP mesurée", l'autre "AEP extrapolée". Si la courbe de puissance mesurée n'inclut pas les données jusqu'à la vitesse de coupure, la courbe de puissance doit être extrapolée entre la vitesse du vent maximale mesurée et la vitesse de coupure.

¹⁶ Il convient de noter que l'intensité des turbulences est mesurée différemment par les anémomètres à coupelles, les dispositifs de télédétection et les anémomètres à ultrasons. Il convient d'en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

De plus, l'*AEP* peut être définie comme une *AEP* générique ou une *AEP* spécifique au site. L'*AEP* générique est mesurée en appliquant la courbe de puissance mesurée aux différentes distributions de fréquence de vitesses du vent de référence. Pour une installation spécifique, les conditions nominales du site spécifiant le régime des vents sur le site peuvent être connues. Dans ce cas, une *AEP* spécifique au site peut également être consignée et calculée en se fondant sur les informations spécifiques à ce site.

Il est à souligner qu'une courbe de puissance déduite à partir des mesures de vitesse du vent à la hauteur du moyeu ne doit être combinée qu'à une distribution de fréquence de vitesses du vent fondée sur la définition de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu pour déduire l'*AEP*, tandis qu'une courbe de puissance déduite à partir des mesures de la REWS ne doit être combinée qu'à une distribution de fréquence REWS pour déduire l'*AEP*. Déduire l'*AEP* à partir de la combinaison d'une courbe de puissance de la REWS et d'une distribution de fréquence de vitesses du vent à la hauteur du moyeu (et vice versa) ne constitue pas un calcul valide. Une distribution de Rayleigh, qui est identique à une distribution de Weibull avec un facteur de forme de 2, doit être utilisée comme distribution de fréquence de vitesses du vent de référence. Les estimations de l'*AEP* doivent être effectuées pour des moyennes annuelles de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu égales à 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s, 10 m/s et 11 m/s, selon l'Equation (17):

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (17)$$

où

AEP est la production annuelle d'énergie;

N_h est le nombre d'heures dans une année $\approx 8\,760$;

n est le nombre de tranches;

V_i est la vitesse du vent normalisée et moyennée dans la tranche i ;

P_i est la puissance de sortie normalisée et moyennée dans la tranche i .

$$F(V) = 1 - \exp \left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right) \quad (18)$$

où

$F(V)$ est la fonction de distribution de probabilité cumulative de Rayleigh pour la vitesse du vent;

V_{ave} est la moyenne annuelle de la vitesse du vent;

V est la vitesse du vent.

La sommation est initialisée en définissant V_{i-1} sur $V_i - 0,5$ m/s et P_{i-1} sur 0,0 kW.

Pour un site spécifique, les conditions nominales spécifiant le régime des vents sur le site peuvent être connues. Dans ce cas, une *AEP* spécifique au site peut également être consignée et calculée en se fondant sur les informations spécifiques à ce site. Si la distribution du vent spécifique au site est connue et qu'elle est présentée sous une forme tabulaire, l'*AEP* spécifique au site peut être calculée en commençant par convertir la distribution du vent en une distribution cumulative correspondante. Le nombre d'heures jusqu'à chaque vitesse du vent mesurée de la courbe de puissance mesurée sera déduit par interpolation linéaire de deux valeurs adjacentes de la distribution cumulative. Ce nombre sera divisé par la somme des heures du tableau, qui correspond typiquement au nombre d'heures nominal d'une année calendaire. Enfin, l'*AEP* sera calculé à l'aide de l'Equation (17). La distribution tabulaire des vitesses du vent doit utiliser la même définition de vitesse du vent (hauteur du moyeu ou REWS) que la courbe de puissance mesurée, faute de quoi aucune *AEP* valide ne peut être déduite.

Si la distribution du vent spécifique au site est présentée comme une distribution de Weibull avec des facteurs de forme et d'échelle connus, l'*AEP* peut être calculée selon l'Equation (17) et en remplaçant l'Equation de distribution cumulative de Rayleigh (18) par l'Equation de distribution de Weibull (19):

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{A_W}\right)^k} \quad (19)$$

où

$F(V)$ est désormais la fonction de distribution de probabilité cumulative de Weibull pour la vitesse du vent;

V est la vitesse du vent;

A_W est le facteur d'échelle de Weibull;

k est le facteur de forme de Weibull.

L'*AEP* mesurée doit être obtenue d'après la courbe de puissance mesurée en prenant pour hypothèse une puissance nulle pour toutes les vitesses du vent supérieures et inférieures à la plage de la courbe de puissance mesurée, puis par sommation selon l'Equation (17).

L'*AEP* extrapolée doit être obtenue à partir de la courbe de puissance mesurée en prenant pour hypothèse une puissance nulle pour toutes les vitesses de vent inférieures à la vitesse la plus basse du vent sur la courbe de puissance mesurée et une puissance constante pour les vitesses de vent comprises entre la vitesse du vent la plus élevée sur la courbe de puissance mesurée et la vitesse de coupure. La puissance constante utilisée pour l'*AEP* extrapolée doit correspondre à la valeur de puissance de la tranche à la vitesse du vent la plus élevée sur la courbe de puissance mesurée.

L'*AEP* mesurée et l'*AEP* extrapolée doivent être présentées dans le rapport d'essai décrit à l'Article 10. Pour tous les calculs de l'*AEP*, la disponibilité de l'éolienne doit être définie à 100 %. Pour des moyennes annuelles données de la vitesse du vent, les estimations de l'*AEP* mesurée doivent être marquées comme "incomplètes" lorsque les calculs montrent que l'*AEP* mesurée est inférieure à 95 % de l'*AEP* extrapolée.

Des estimations de l'incertitude de mesure en termes d'incertitude-type sur l'*AEP*, conformément à l'Annexe D, doivent être consignées pour l'*AEP* mesurée pour l'ensemble des distributions des vitesses du vent utilisées.

Les incertitudes sur l'*AEP*, décrites ci-dessus, ne tiennent compte que des incertitudes issues de l'essai de performance de puissance; elles ne tiennent pas compte des incertitudes dues à d'autres facteurs importants associés à la production d'énergie réelle pour une installation donnée.

9.4 Coefficient de puissance

Le coefficient de puissance C_P de l'éolienne doit être ajouté aux résultats d'essai et présenté comme décrit à l'Article 10. C_P doit être déterminé à partir de la courbe de puissance mesurée, selon l'Equation (20):

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3} \quad (20)$$

où

$C_{P,i}$ est le coefficient de puissance dans la tranche i ;

- V_i est la vitesse du vent normalisée et moyennée dans la tranche i (qui correspond à la vitesse du vent définie comme vitesse du vent équivalente du rotor ou vitesse du vent à la hauteur du moyeu);
- P_i est la puissance de sortie normalisée et moyennée dans la tranche i ;
- A est la surface balayée par le rotor de l'éolienne;
- ρ_0 est la masse volumique de l'air de référence.

10 Format de rapport

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes:

- a) Identification et description de la configuration spécifique de l'éolienne à l'essai (voir 6.2), notamment:
- 1) la marque, le type, le numéro de série, l'année de production de l'éolienne;
 - 2) le diamètre du rotor et une description de la méthode de vérification utilisée ou un renvoi à la documentation relative au diamètre du rotor;
 - 3) la vitesse du rotor ou la plage de vitesses du rotor;
 - 4) la puissance assignée et la vitesse du vent assignée;
 - 5) les données relatives aux pales: marque, type, numéros de série, nombre de pales, pas fixe ou variable, angle(s) de pas;
 - 6) la hauteur du moyeu et le type de mât;
 - 7) une description du système de contrôle (dispositif et version logicielle) et une documentation des signaux d'état utilisés pour la réduction des données;
 - 8) une description des conditions de raccordement au réseau électrique au niveau de l'éolienne (tension, fréquence et tolérances associées), ainsi qu'un schéma indiquant l'emplacement auquel est raccordé le transducteur de puissance, à savoir un transformateur interne ou externe, ainsi que la consommation électrique propre de l'éolienne;
- b) Description du site d'essai (voir 6.3), notamment:
- 1) des photographies de tous les secteurs de mesure, prises de préférence depuis l'éolienne à la hauteur du moyeu;
 - 2) une carte du site d'essai représentant la surface des environs sur une distance radiale égale à au moins 20 fois le diamètre du rotor de l'éolienne et indiquant la topographie, l'emplacement de l'éolienne, le matériel de mesure du vent, les obstacles significatifs, les autres éoliennes ainsi que le secteur de mesure;
 - 3) les résultats de l'évaluation du site, c'est-à-dire les limites du ou des secteurs de mesure valides;
 - 4) si un étalonnage du site est effectué, les limites du ou des secteurs de mesure finals doivent également être consignées, y compris la justification des variations éventuelles résultant de l'évaluation du site;
 - 5) un tableau des coordonnées et de l'altitude de l'éolienne à l'essai, du matériel de mesure du vent et des éventuels obstacles significatifs étudiés lors de l'évaluation des obstacles;
- c) Description du matériel d'essai (voir Article 7):
- 1) l'identification de tous les capteurs, du matériel de mesure du vent et du système d'acquisition de données, y compris la documentation pour l'étalonnage des capteurs, du matériel de mesure du vent, des lignes de transmission du signal et du système d'acquisition de données;
 - 2) un croquis du montage du mât météorologique indiquant les dimensions du mât et le montage des instruments, conformément à l'Annexe G;

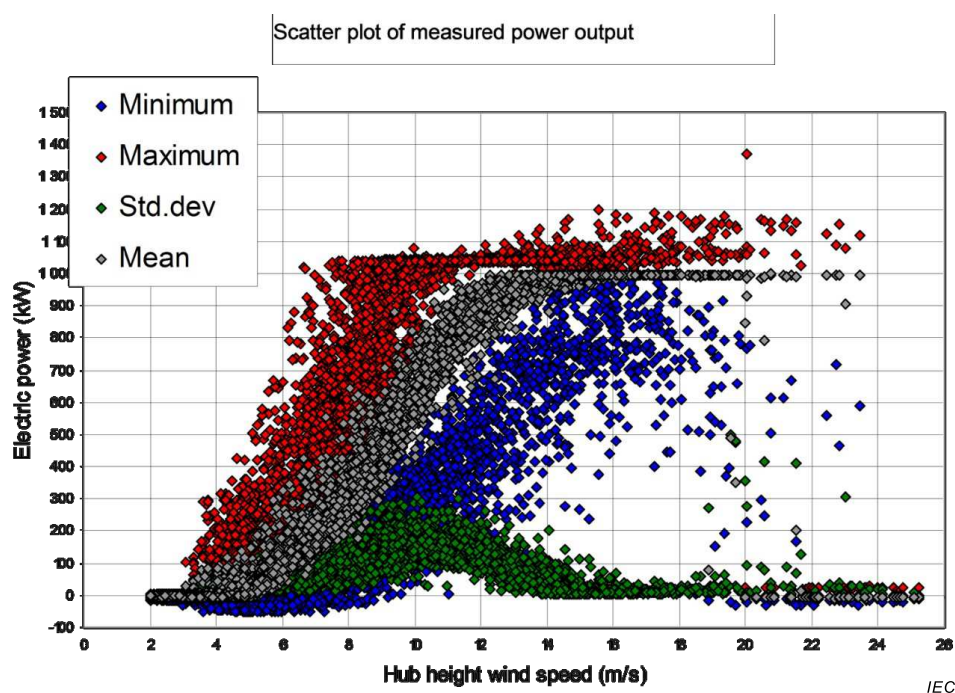
- 3) une description de la méthode utilisée pour garantir que l'étalonnage du matériel de mesure du vent est resté valide pendant toute la durée de la période de mesure, ainsi qu'une documentation des résultats montrant que l'étalonnage est maintenu;
- d) Description de la procédure de mesure (voir Article 8):
- 1) une documentation des étapes du mode opératoire, des conditions d'essai, de la fréquence d'échantillonnage, du temps de moyennage et de la période de mesure, y compris:
 - la documentation des étalonnages, des corrections ou des fonctions de transfert appliquées par l'enregistreur de données et/ou par post-traitement;
 - 2) un journal de bord d'essai consignait tous les événements importants qui se sont produits lors de l'essai de performance de puissance, y compris:
 - une liste de toutes les activités de maintenance qui ont eu lieu pendant l'essai;
 - une liste de toutes les actions spéciales (par exemple, un lavage des pales) qui ont été effectuées pour garantir une bonne performance;
 - 3) une liste complète de tous les critères de filtrage utilisés pour produire le résultat consigné, y compris:
 - le paramètre, la mesure, la durée ou une combinaison des paramètres filtrés;
 - la plage ou le critère logique relatif au filtre;
 - la justification du filtre;
 - l'ordre dans lequel les filtres ont été appliqués doit être consigné, avec le nombre de points supprimé à chaque itération. A défaut, le nombre de points de données que le filtre supprimerait de la base de données par lui-même;
 - le nombre initial d'ensembles de données dans la base de données et le nombre final d'ensembles de données après l'application de tous les filtres;
- e) Présentation des données mesurées (voir 8.3 à 8.5). Les données de chaque ensemble de données choisi doivent être présentées au format tabulaire et graphique, ce qui permet de fournir des statistiques concernant la puissance de sortie mesurée en fonction de la vitesse du vent et de paramètres météorologiques importants (lorsque des mesures de la REWS sont disponibles, les données mesurées doivent être présentées séparément pour la hauteur du moyeu et la REWS), y compris:
- 1) des diagrammes de dispersion représentant les moyennes, les écarts-types, la puissance de sortie minimale et maximale en fonction de la vitesse du vent (les tracés doivent inclure des informations concernant la fréquence d'échantillonnage). Un exemple est donné à la Figure 5;
 - 2) des diagrammes de dispersion représentant la vitesse moyenne du vent et l'intensité des turbulences en fonction de la direction du vent;
 - 3) des diagrammes de dispersion représentant l'intensité des turbulences en fonction de la vitesse du vent (l'intensité des turbulences moyenne dans chaque tranche de vitesse du vent doit être représentée);
 - 4) il convient également de présenter, comme décrit ci-dessus, les bases de données spéciales constituées de données recueillies dans des conditions d'exploitation ou dans des conditions atmosphériques particulières;
 - 5) S'ils ont été mesurés, la vitesse de rotation et l'angle de pas doivent être représentés sous la forme d'un diagramme de dispersion incluant les valeurs de tranche en fonction de la vitesse du vent ainsi qu'un tableau des valeurs de tranche;
 - 6) la définition des signaux d'état et des tracés des signaux d'état pendant la période de mesure;
 - 7) des diagrammes de dispersion représentant la masse volumique de l'air en fonction de la direction du vent et de la vitesse du vent, y compris la moyenne par tranche;
 - 8) un diagramme de dispersion représentant l'exposant de cisaillement du vent par rapport à l'heure du jour et en fonction de la vitesse du vent. L'exposant de cisaillement du vent dans la moitié inférieure du rotor et l'exposant de cisaillement du vent dans la moitié supérieure du rotor doivent être présentés séparément. En outre,

- les valeurs moyennes des deux exposants de cisaillement du vent par tranche de vitesse du vent doivent être représentées;
- 9) l'exposant moyen de cisaillement du vent ou une représentation équivalente des conditions de cisaillement du vent du site lors de l'essai;
 - 10) le facteur de correction du cisaillement du vent, conformément à 9.1.3.3, si applicable, en fonction de la configuration de la mesure (utiliser l'Equation (9) ou l'Equation (10), en fonction de la configuration de la mesure);
 - 11) la masse volumique de l'air moyenne mesurée lors de l'essai;
- f) Présentation de la courbe de puissance mesurée pour la masse volumique de l'air de référence (voir 9.1 et 9.2), pour la courbe de puissance déduite à partir de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, ainsi que la courbe de puissance déduite de la REWS si elle est mesurée:
- 1) la courbe de puissance doit être représentée sous la forme d'un tableau similaire au Tableau 4¹⁷. Pour chaque tranche de vitesse du vent, le tableau doit répertorier:
 - la vitesse du vent normalisée et moyennée;
 - la puissance de sortie normalisée et moyennée;
 - le nombre d'ensembles de données;
 - la valeur C_p calculée;
 - les incertitudes-types de catégorie A (voir Annexe D et Annexe E);
 - les incertitudes-types de catégorie B (voir Annexe D et Annexe E);
 - l'incertitude-type composée (voir Annexe D et Annexe E);
 - 2) la courbe de puissance doit être représentée sous la forme d'un graphique similaire à la Figure 6. Le graphique doit représenter les caractéristiques suivantes en fonction de la vitesse du vent normalisée et moyennée:
 - la puissance de sortie normalisée et moyennée;
 - l'incertitude-type composée;
 - 3) la courbe C_p doit être représentée sous la forme d'un graphique similaire à la Figure 7;
 - 4) le graphique et le tableau doivent mentionner la masse volumique de l'air de référence utilisée pour la normalisation;
 - 5) si la vitesse de coupure a été atteinte pendant la période de mesure, la courbe de puissance et la courbe C_p ou les parties des courbes influencées par l'hystérésis de coupure peuvent être présentées d'une manière similaire aux éléments 1), 2), 3) et 4).
- g) Présentation des courbes de puissance mesurées recueillies dans des conditions d'exploitation et des conditions atmosphériques particulières:
- 1) les courbes de puissance déduites à partir des sous-ensembles de la base de données pour des conditions d'exploitation ou des conditions atmosphériques particulières peuvent également être consignées. Si tel est le cas, il convient de consigner une courbe de puissance de la même manière que pour la masse volumique de l'air de référence, mais selon la masse volumique déduite à partir de la moyenne de la masse volumique de l'air mesurée pour les sous-ensembles de la base de données ou, à défaut, en utilisant une masse volumique de l'air nominale prédéfinie pour le site.
- h) Présentation de la production annuelle d'énergie estimée pour la masse volumique de l'air de référence (voir 9.3), pour la courbe de puissance déduite de la vitesse du vent à la

¹⁷ En plus de représenter la courbe de puissance mesurée dans un tableau, conformément à f)1), la courbe de puissance mesurée peut être représentée sous la forme de valeurs au centre de la tranche. La méthode recommandée consiste à utiliser une fonction spline cubique pour l'interpolation entre les valeurs de tranches du tableau afin de représenter la vitesse du vent, la puissance et le coefficient de puissance mesurés au centre de la tranche.

hauteur du moyeu, ainsi que la courbe de puissance déduite de la REWS si elle est mesurée:

- 1) un tableau similaire au Tableau 5 qui doit inclure pour chaque moyenne annuelle de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu:
 - l'*AEP* mesurée;
 - l'incertitude-type de l'*AEP* mesurée (voir Annexe D et Annexe E);
 - l'*AEP* extrapolée;
 - 2) le tableau doit également mentionner:
 - la masse volumique de l'air de référence;
 - la vitesse de coupure;
 - 3) pour toute moyenne annuelle de la vitesse du vent, si l'*AEP* mesurée est inférieure à 95 % de la production annuelle d'énergie extrapolée, le tableau doit également inclure la mention "incomplet" dans la colonne des valeurs de l'*AEP* mesurée;
- i) Présentation du coefficient de puissance mesuré (voir 9.4):
- 1) il convient de représenter le coefficient de puissance mesuré en fonction de la vitesse du vent sous la forme d'un tableau et d'un graphique, où la surface balayée par le rotor doit être indiquée;
- j) Présentation des résultats de l'étalonnage du site (voir Annexe C pour les exigences de consignation):
- 1) si un étalonnage du site a été réalisé, il doit être consigné dans le rapport sous la forme d'un tableau;
 - 2) le tableau doit présenter pour chaque tranche de direction du vent:
 - les limites minimale et maximale de direction du vent;
 - la direction du vent moyennée par tranche;
 - les caractéristiques de la correction de la vitesse du vent;
 - le nombre d'heures de données;
 - l'incertitude-type composée du rapport de vitesses du vent pour 6 m/s, 10 m/s et 14 m/s;
 - 3) le rapport doit en outre inclure les graphiques et les tableaux exigés à l'Annexe C;
- k) Incertitude de mesure (voir Annexe D):
- 1) des hypothèses d'incertitude doivent être fournies pour toutes les composantes d'incertitude;
- l) Ecarts par rapport à la procédure:
- 1) tout écart par rapport aux exigences de la présente norme doit être clairement documenté dans un article distinct. Pour chaque écart doivent être fournies des justifications techniques, ainsi qu'une estimation de son effet sur les résultats d'essai.



Anglais	Français
Scatter plot of measured power output	Diagramme de dispersion de la puissance de sortie mesurée
Minimum	Valeurs minimales
Maximum	Valeurs maximales
Std. dev	Ecart-types
Mean	Moyennes
Electric power (kW)	Puissance électrique (kW)
Hub height wind speed (m/s)	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu (m/s)

Figure 5 – Présentation d'un exemple de base de données: diagramme de dispersion de l'essai de performance de puissance échantillonné à 1 Hz (valeurs moyennes moyennées sur 10 min)

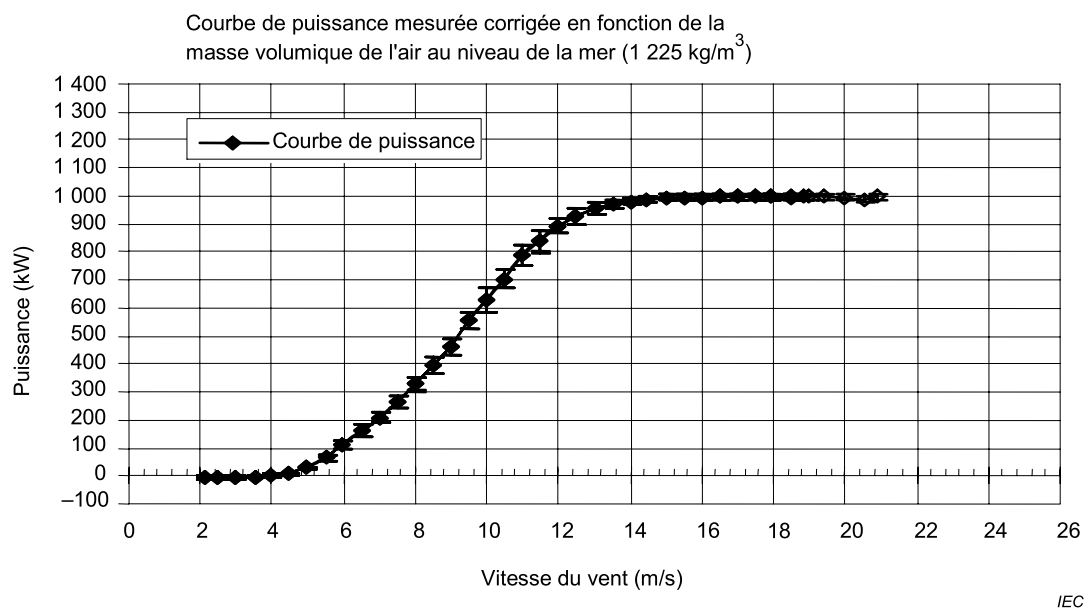


Figure 6 – Présentation d'un exemple de courbe de puissance mesurée

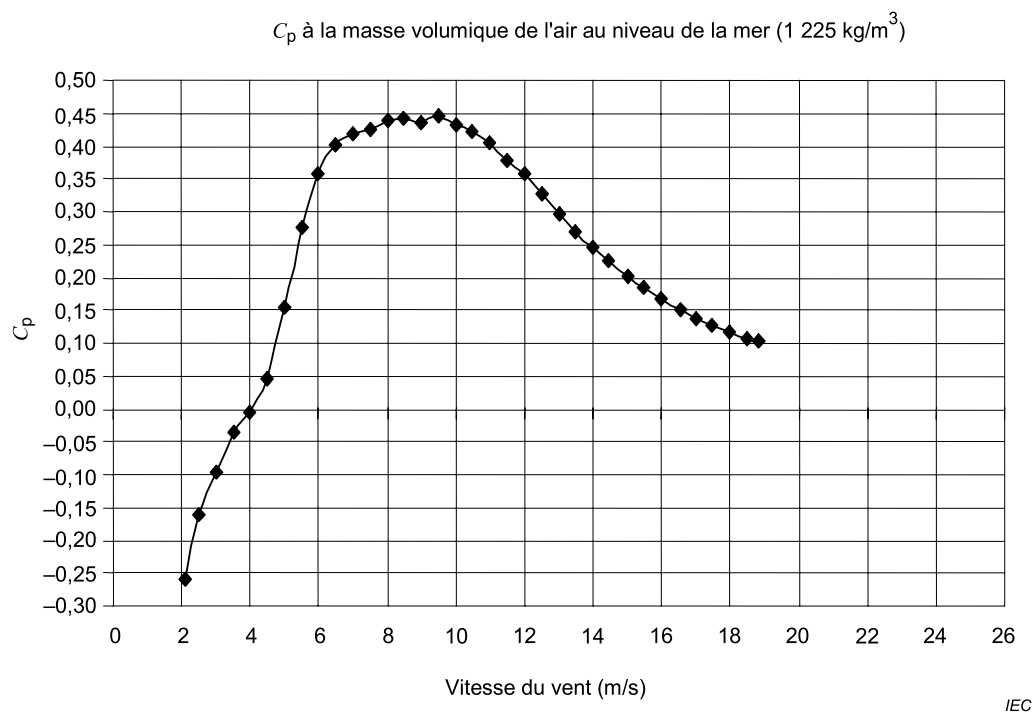


Figure 7 – Présentation d'un exemple de courbe C_p

Tableau 4 – Exemple de présentation d'une courbe de puissance mesurée

Courbe de puissance mesurée							
Masse volumique de l'air de référence: 1,225 kg/m ³					Catégorie A	Catégorie B	Incertitude composée
N° de tranche	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu [m/s]	Puissance de sortie [kW]	C_P	Nombre d'ensembles de données (moyennés sur 10 min)	Incertitude-type s_i [kW]	Incertitude-type u_i [kW]	Incertitude-type u_{ci} [kW]
4	2,1	–3,6	–0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	–3,6	–0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	–3,8	–0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	–2,2	–0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	–0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	996,6	0,10	14	0,59	11,3	11,3
39	19,4	996,1	0,09	10	0,21	11,3	11,3
40	20,0	994,1	0,09	5	0,41	11,3	11,3

Courbe de puissance mesurée							
Masse volumique de l'air de référence: 1,225 kg/m ³					Catégorie A	Catégorie B	Incertitude composée
N° de tranche	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu [m/s]	Puissance de sortie [kW]	C_P	Nombre d'ensembles de données (moyennés sur 10 min)	Incertitude-type s_i [kW]	Incertitude-type u_i [kW]	Incertitude-type u_{ci} [kW]
41	20,5	987,4 ¹⁸	0,08	2	2,67	11,4	11,7
42	20,9	996,9	0,08	3	3,38	11,8	12,3

Tableau 5 – Exemple de présentation d'une production annuelle d'énergie estimée

Production annuelle d'énergie estimée					
Masse volumique de l'air de référence: 1,225 kg/m ³					
Vitesse de coupure: 25 m/s					
(extrapolation par puissance constante après la dernière tranche)					
Moyenne annuelle de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu (Rayleigh) m/s	AEP mesurée (courbe de puissance mesurée) MWh	Incertitude-type de l'AEP MWh	Incertitude-type de l'AEP %	AEP extrapolée (courbe de puissance extrapolée) MWh	
4	480	82	17	480	
5	1 081	113	10	1 081	
6	1 824	138	8	1 824	
7	2 595	155	6	2 603	
8	3 305	163	5	3 342	
9	3 889	165	4	3 995	
10	4 318	162	4	4 536	
11	4 592	157	3	4 954	Incomplet

NOTE Les chiffres d'incertitude-type dans les tableaux ci-dessus sont basés sur un facteur de couverture de 1. Cela implique que le niveau de confiance (soit le nombre de fois, en pourcentage, dans les mesures de la courbe de puissance répétées, où les intervalles contiendront la "vraie" valeur de l'AEP) est de l'ordre de 58 % à 68 %. Le niveau de confiance n'est qu'une estimation; en effet, la distribution de probabilité du mesurande n'est normalement pas connue en détail. La valeur supérieure (68 %) s'applique aux distributions normales, tandis que la valeur inférieure (58 %) s'applique aux distributions rectangulaires.

¹⁸ L'ensemble de données de la tranche 41 est incomplet (moins de 3 ensembles de données); la valeur de puissance dans la tranche 41 pour le calcul de l'AEP est donc interpolée à 995,7.

Annexe A (normative)

Evaluation des influences des éoliennes et des obstacles présents sur le site d'essai

A.1 Généralités

L'Annexe A décrit une procédure permettant de déterminer un ou plusieurs secteurs qui ne sont pas aptes à l'essai car l'écoulement au niveau de l'éolienne à l'essai et/ou l'écoulement à l'emplacement du matériel de mesure du vent (WME, "*wind measurement equipment*": mât météorologique ou dispositif de télédétection) pourraient être affectés par une éolienne en exploitation et/ou par un obstacle.

La procédure comporte deux étapes, qui doivent être appliquées dans l'ordre suivant¹⁹:

- a) évaluation des influences des éoliennes en exploitation (les éoliennes à l'essai, mais aussi les éoliennes voisines en exploitation), décrite à l'Article A.2;
- b) évaluation des influences des obstacles décrite à l'Article A.3 (compte tenu des exigences spéciales pour les obstacles étendus, décrites à l'Article A.5).

Le secteur valide retenu à l'issue de cette procédure doit être utilisé pour l'évaluation du terrain conformément à l'Annexe B.

L'objectif de l'étalonnage du site est généralement de mesurer les variations intervenant dans la couche limite, car elles suivent l'orographie, qui est généralement un écoulement associé, alors que les obstacles produisent souvent des sillages plus turbulents, lesquels sont affectés par les bords saillants et les surfaces verticales qui peuvent entraîner une séparation de l'écoulement. En général, l'étalonnage du site ne permet donc pas de corriger correctement les effets de la séparation de l'écoulement. Il convient de tenir compte de ce fait au moment de décider de traiter un objet comme un obstacle ou comme un terrain, car la séparation de l'écoulement et les sillages très turbulents doivent être évités. En ce sens, il est recommandé de traiter comme un obstacle (y compris les éléments orographiques qui satisfont aux critères dimensionnels) un objet dont la hauteur est supérieure à plus de la moitié de sa largeur.

A.2 Exigences relatives aux éoliennes voisines en exploitation

Le WME ne doit pas être influencé par l'éolienne à l'essai.

L'éolienne à l'essai et le WME ne doivent pas être influencés par des éoliennes voisines en exploitation. Si une éolienne voisine fonctionne à un moment donné pendant l'essai de performance de puissance, son sillage doit être déterminé et pris en compte, comme décrit dans la présente annexe (à l'aide des calculs donnés à l'Article A.4). Les petites éoliennes dont la hauteur totale est inférieure à $(2/3)(H - D/2)$ doivent être traitées comme des obstacles et prises en compte comme décrit à l'Article A.3.

Si une éolienne est arrêtée à un moment donné pendant l'essai de performance de puissance, elle doit être considérée comme un obstacle et prise en compte comme décrit à l'Article A.3.

La distance minimale entre l'éolienne à l'essai et les éoliennes voisines en exploitation doit être égale à deux fois le diamètre du rotor D_n de l'éolienne voisine. La distance minimale

¹⁹ Il est à noter que l'étape b) exige de connaître le secteur de mesure préliminaire, qui est le résultat de l'étape a).

entre le WME et une éolienne voisine en exploitation doit être égale à deux fois le diamètre du rotor de l'éolienne en question. Les secteurs à exclure en raison des sillages des éoliennes voisines en exploitation doivent être choisis à partir de la Figure A.1. Les dimensions à prendre en compte sont la distance réelle L_n et le diamètre du rotor D_n de l'éolienne voisine en exploitation. Les secteurs à exclure doivent être déduits pour l'éolienne à l'essai et pour le WME; ils doivent également être centrés sur la direction entre l'éolienne voisine en exploitation et le WME ou l'éolienne. Un exemple est donné à la Figure A.2.

A.3 Exigences pour les obstacles

Les obstacles proches de l'éolienne à l'essai ou du WME doivent être évalués. Chaque obstacle doit être évalué comme élément de l'orographie (comme décrit à l'Annexe B²⁰) ou, à défaut, conformément à la procédure décrite ci-après.

Aucun obstacle significatif (par exemple, des bâtiments, des arbres, des éoliennes immobilisées) ne doit être présent dans le secteur de mesure à une distance raisonnable de l'éolienne ou du WME. Seuls des petits bâtiments liés à l'exploitation de l'éolienne ou du matériel de mesure du vent sont acceptables. Lorsque des obstacles significatifs sont présents, le secteur de mesure doit être réduit, comme décrit aux Articles A.4 et A.5.

Le critère permettant de déterminer l'importance d'un obstacle (par rapport à l'éolienne à l'essai et/ou au WME) consiste à dépasser au moins l'une des limites données dans le Tableau A.1, le Tableau A.1 devant être appliqué pour tous les emplacements:

- a) aux fins d'évaluation des environs de l'éolienne à l'essai (c'est-à-dire en utilisant le centre de l'éolienne à l'essai comme centre des cercles $2L$, $4L$, $8L$ et $16L$);
- b) aux fins d'évaluation des environs du WME (c'est-à-dire en utilisant la ou les positions du matériel comme centre des cercles $2L$, $4L$, $8L$ et $16L$).

**Tableau A.1 – Exigences relatives aux obstacles:
pertinence des obstacles**

Distance ^a	Secteur ^b	Hauteur maximale de l'obstacle par rapport à la surface du terrain ^c
$<2L$	360°	$<1/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ et $< 4L$	Secteur de mesure préliminaire	$<2/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 4L$ et $<8L$	Secteur de mesure préliminaire	$< (H - 0,5 D)$
$\geq 8L$ et $<16L$	Secteur de mesure préliminaire	$<4/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ et $<16L$	Clairement à l'extérieur du secteur de mesure préliminaire d'au moins 40°	Aucune limite de hauteur
^a De l'obstacle à l'éolienne à l'essai ou de l'obstacle au WME, respectivement – L étant la distance horizontale entre l'éolienne à l'essai et le WME. ^b Le <i>secteur de mesure préliminaire</i> doit être entendu ici comme le secteur valide restant après évaluation des éoliennes voisines en exploitation (comme décrit à l'Article A.2, selon le calcul donné à l'Article A.4), toutes les directions inférieures à 40° à l'extérieur devant également être prises en compte. ^c H est la hauteur du moyeu, et D est le diamètre du rotor de l'éolienne à l'essai.		

²⁰ Généralement, envisager un obstacle de cette manière augmentera surtout la variation du terrain, tandis que les effets sur la pente pourraient être minimales (sauf pour les obstacles étendus, comme des forêts).

A.4 Méthode de calcul des secteurs à exclure

L'influence du sillage de l'éolienne à l'essai sur le WME doit toujours être évaluée conformément à la Figure A.1.

L'influence du sillage d'une éolienne voisine en exploitation sur l'éolienne à l'essai doit toujours être évaluée conformément à la Figure A.1, de même que l'influence de son sillage sur le WME.

Concernant les éoliennes en exploitation, les dimensions à prendre en compte sont la distance réelle L_n (entre le centre de l'éolienne à l'essai et la position du WME) et le diamètre du rotor D_n de l'éolienne produisant le sillage²¹.

L'influence du sillage d'un obstacle sur l'éolienne à l'essai doit être évaluée conformément à la Figure A.1 si l'obstacle est significatif par rapport à l'éolienne à l'essai selon le Tableau A.1.

L'influence du sillage d'un obstacle sur le WME doit être évaluée conformément à la Figure A.1 si l'obstacle est significatif par rapport au WME selon le Tableau A.1.

Concernant les obstacles, les dimensions à prendre en compte sont la distance horizontale réelle L_e (depuis le centre de l'éolienne à l'essai ou la position du WME, selon le cas) et un diamètre équivalent D_e du rotor de l'obstacle. Une éolienne voisine arrêtée peut être traitée comme un cylindre d'un diamètre égal à celui de la base du mât et d'une hauteur égale à celle de son extrémité supérieure. Le diamètre équivalent du rotor de l'obstacle doit être défini comme suit:

$$D_e = \frac{2l_h l_w}{l_h + l_w} \quad (\text{A.1})$$

où

D_e est le diamètre équivalent du rotor;

l_h est la hauteur de l'obstacle;

l_w est la largeur de l'obstacle examinée à partir de l'éolienne à l'essai ou du WME.

²¹ L'influence de l'éolienne à l'essai sur le WME est évaluée à l'aide de L (distance entre l'éolienne à l'essai et le WME) et de D (diamètre du rotor de l'éolienne à l'essai).

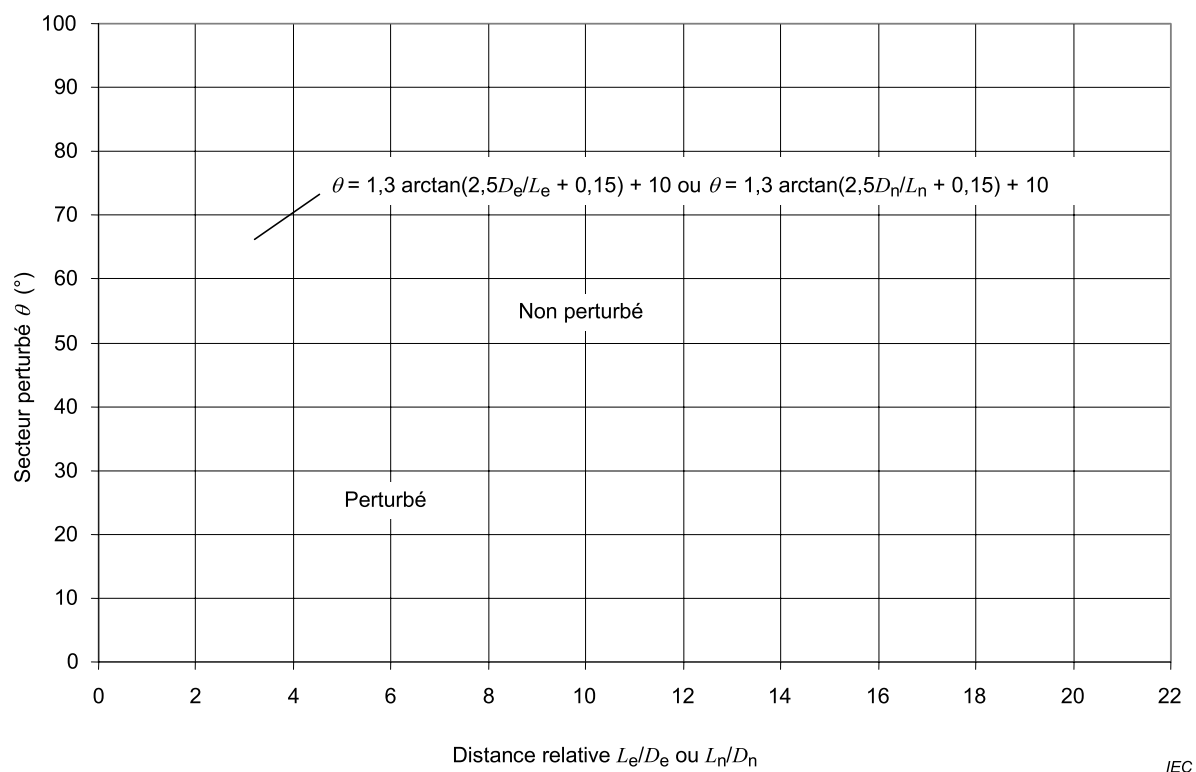
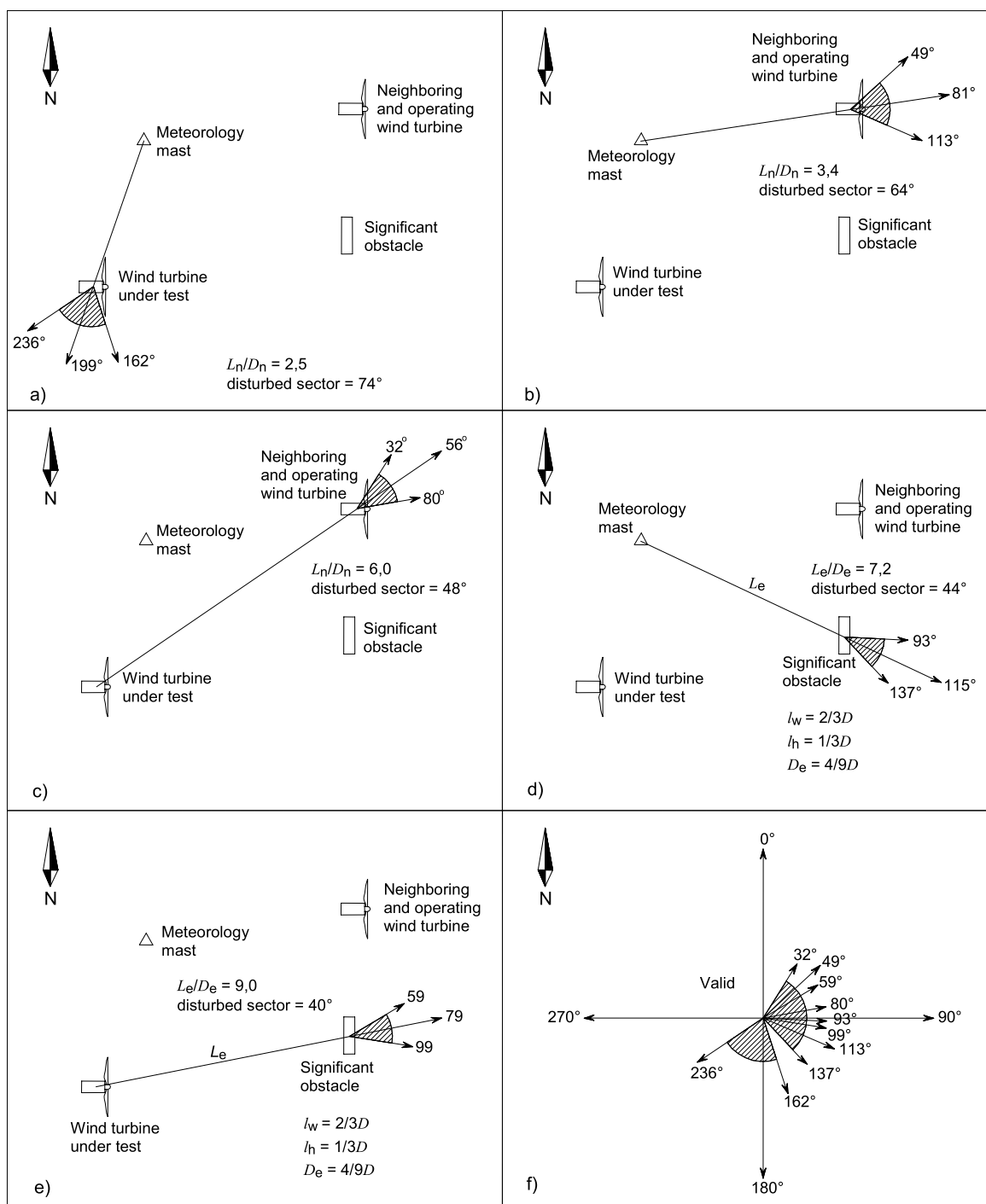


Figure A.1 – Secteurs à exclure en raison des sillages d'éoliennes voisines en exploitation et d'obstacles significatifs



IEC

Anglais	Français
Wind measurement equipment	Matériel de mesure du vent
Neighboring and operating wind turbine	Eolienne voisine en exploitation
Significant obstacle	Obstacle significatif
Wind turbine under test	Eolienne à l'essai
$L_n/D_n =$ Disturbed sector =	$L_n/D_n =$ Secteur perturbé =
Valid	Valide

Figure A.2 – Exemple de secteurs à exclure en raison des sillages de l'éolienne à l'essai, d'une éolienne voisine en exploitation et d'un obstacle significatif

Les figures représentent les secteurs à exclure si:

- a) le WME (mât météorologique ou dispositif de télédétection) se trouve dans le sillage de l'éolienne à l'essai;
- b) le WME se trouve dans le sillage de l'éolienne voisine en exploitation;
- c) l'éolienne à l'essai se trouve dans le sillage de l'éolienne voisine en exploitation;
- d) le WME se trouve dans le sillage de l'obstacle significatif;
- e) l'éolienne à l'essai se trouve dans le sillage de l'obstacle significatif;
- f) tous les effets a) à e) ci-dessus sont combinés.

NOTE L'exemple de la Figure A.2 est fondé sur l'hypothèse que l'obstacle est significatif (conformément au Tableau A.1) par rapport à l'éolienne à l'essai, mais aussi par rapport au matériel de mesure du vent.

A.5 Exigences spéciales relatives aux obstacles étendus

Les obstacles situés à une distance inférieure à $4L$ (depuis le centre de l'éolienne à l'essai ou le matériel de mesure du vent) qui s'étendent sur plus de 50 m dans toute direction horizontale doivent être divisés en obstacles partiels ne dépassant pas 50 m dans toute direction horizontale et s'étendant sur 50 m exactement pour les dimensions supérieures à 50 m. Ces obstacles partiels peuvent se chevaucher. La combinaison de ces obstacles partiels doit au moins²² couvrir entièrement l'obstacle d'origine. Chaque obstacle partiel doit être évalué séparément. L'importance de chaque obstacle partiel doit être évaluée; si elle se révèle significative, le secteur à exclure doit être déterminé. Par exemple:

- a) Un obstacle de 90 m sur 90 m est divisé en 4 obstacles partiels de 50 m sur 50 m chacun. Ces obstacles partiels sont choisis de telle manière qu'ils se chevauchent sur 10 m, afin que l'union définie des 4 obstacles partiels soit identique à l'obstacle d'origine.
- b) Un obstacle de 70 m sur 10 m est divisé en 2 obstacles partiels de 50 m sur 10 m chacun. Ces obstacles partiels sont choisis de telle manière qu'ils se chevauchent sur 30 m, afin que l'union définie des 2 obstacles partiels soit identique à l'obstacle d'origine.

Un bosquet d'arbres ou une forêt doivent être traités de cette manière.

²² A des fins pratiques, il est judicieux de créer des obstacles partiels qui ont tous la même forme (par exemple, des carrés de 50 m x 50 m). Il s'agit d'une approche prudente; par conséquent, elle est admise. (Dans ce cas, l'union définie de tous les obstacles partiels couvre une surface plus grande que l'obstacle d'origine.)

Annexe B (normative)

Evaluation du terrain sur le site d'essai

Pour les essais réalisés sans étalonnage du site (sur un terrain défini comme "terrain plat"), les critères suivants doivent être observés (voir Figure B.1 et Tableau B.1 pour plus d'informations):

- l'orographie sur le site d'essai ne peut montrer que des variations mineures par rapport à un plan qui passe par la base du mât de l'éolienne, et par le terrain dans le secteur concerné;
- aucun de ces plans ne doit dépasser une certaine limite pour la pente.

Le terrain doit être évalué à l'aide d'un modèle numérique du terrain avec une résolution de 30 m ou plus fine.

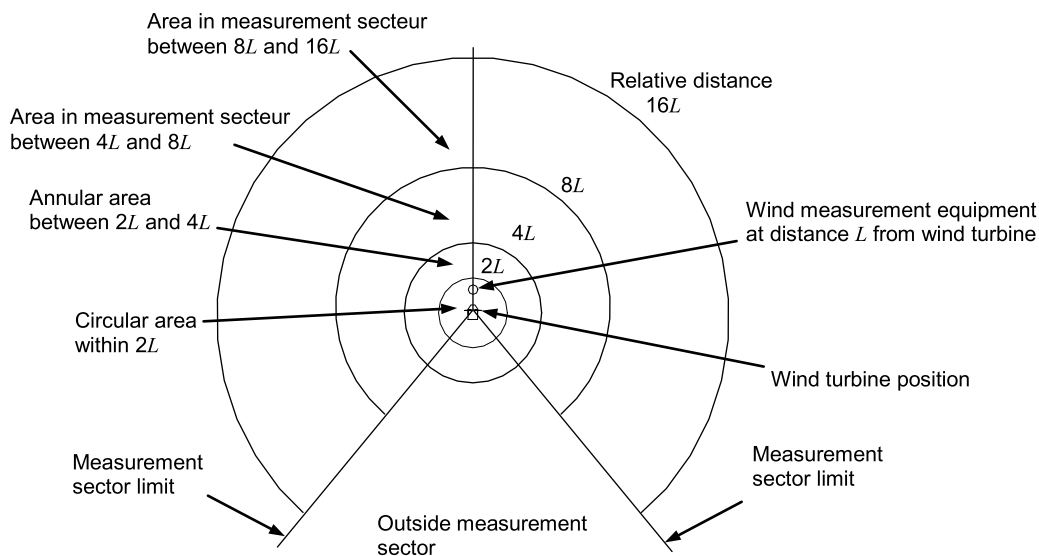
Le Tableau B.1 doit être appliqué pour les emplacements ci-dessous concernant le secteur de mesure:

- a) à des fins d'évaluation des environs de l'éolienne à l'essai (c'est-à-dire en utilisant le centre de l'éolienne à l'essai comme centre des cercles $2L$, $4L$, $8L$ et $16L$);
- b) à des fins d'évaluation des environs du WME (c'est-à-dire en utilisant la ou les positions du matériel comme centre des cercles $2L$, $4L$, $8L$ et $16L$).

Si le terrain satisfait à toutes les exigences du Tableau B.1 dans les deux cas, aucun étalonnage du site n'est exigé²³ en raison de l'orographie. Sinon, le terrain est défini comme "terrain complexe" et une mesure de l'étalonnage du site est exigée.

Dans le Tableau B.1, L est la distance entre l'éolienne et le WME, H est la hauteur du moyeu et D est le diamètre du rotor (de l'éolienne à l'essai).

²³ D'autres aspects du terrain, comme la rugosité, la distance par rapport au bord de la mer, mais aussi d'autres considérations, peuvent toutefois conduire à la conclusion qu'un étalonnage du site est recommandé.



IEC

Anglais	Français
Area in measurement sector between $8L$ and $16L$	Surface du secteur de mesure située entre $8L$ et $16L$
Area in measurement sector between $4L$ and $8L$	Surface du secteur de mesure située entre $4L$ et $8L$
Annular area between $2L$ and $4L$	Surface annulaire située entre $2L$ et $4L$
Circular area within $2L$	Surface circulaire située à moins de $2L$
Measurement sector limit	Limite du secteur de mesure
Relative distance $16L$	Distance relative $16L$
Wind measurement equipment at distance L from wind turbine	Matériel de mesure du vent situé à une distance L de l'éolienne
Wind turbine position	Emplacement de l'éolienne
Measurement sector limit	Limite du secteur de mesure
Outside measurement sector	Hors du secteur de mesure

Figure B.1 – Représentation de la surface à évaluer, vue de dessus

Tableau B.1 – Exigences relatives au site d'essai: variations topographiques

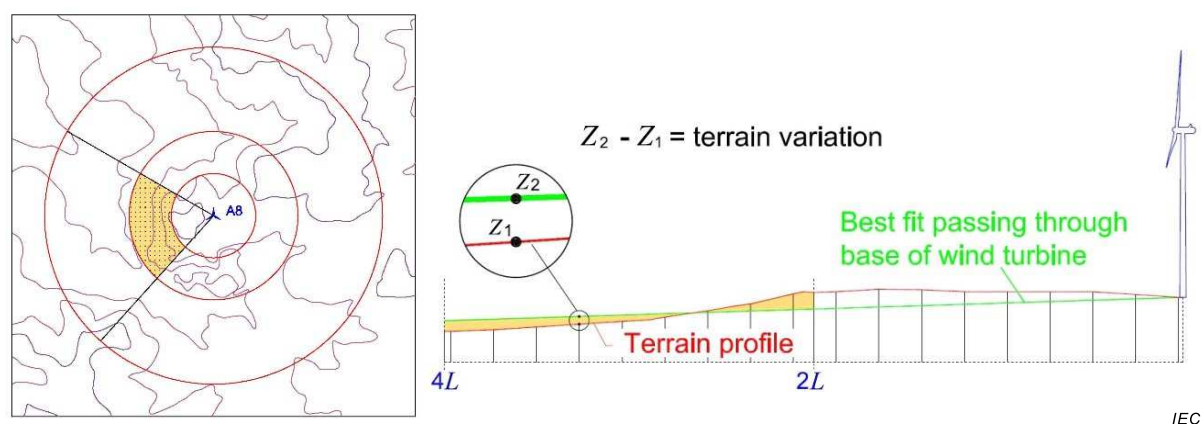
Distance	Secteur ^a	Pente maximale %	Variation maximale du terrain par rapport au plan
$<2L$	360°	$<3^b$	$<1/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ et $< 4L$	Secteur de mesure	$<5^b$	$<2/3 (H - 0,5 D)$
$\geq 2L$ et $<4L$	A l'extérieur du secteur de mesure	$<10^c$	Non applicable
$\geq 4L$ et $<8L$	Secteur de mesure	$<10^b$	$< (H - 0,5 D)$
$\geq 8L$ et $<16L$	Secteur de mesure	$<10^c$	Non applicable

^a Le secteur de mesure est entendu ici par défaut comme le secteur valide restant après l'exécution de la procédure décrite à l'Annexe A, l'utilisation d'un secteur de mesure de moindres dimensions étant également admise²⁴.

^b La pente maximale du plan, qui constitue la pente idéale pour le terrain dans le secteur envisagé et qui traverse la base du mât. Voir exemple à la Figure B.2.

^c La ligne de la pente la plus inclinée qui relie la base du mât aux points individuels du terrain à la surface du terrain dans les limites du secteur. Voir exemple à la Figure B.3.

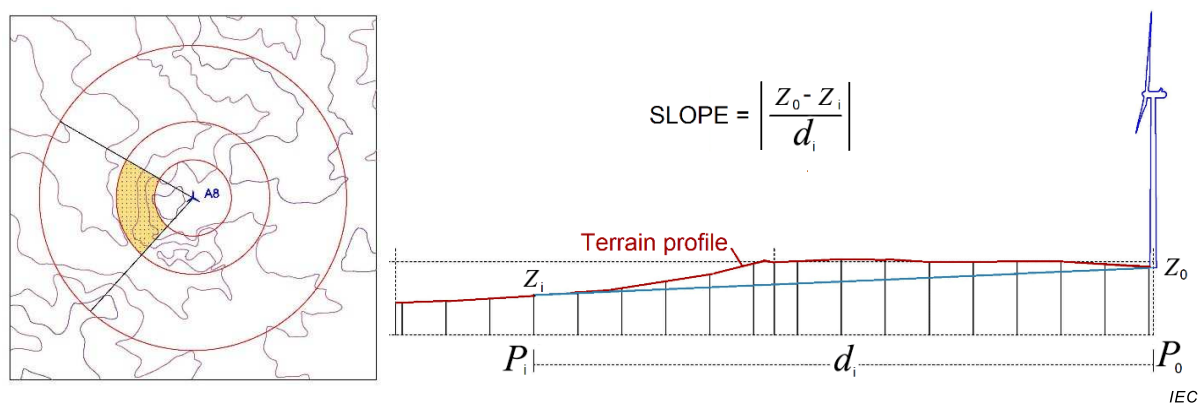
²⁴ Il est en outre recommandé de vérifier si une variation significative du terrain existe légèrement à l'extérieur des limites du secteur. Dans ce cas, il convient que le secteur final envisagé pour l'essai de performance de puissance maintienne une distance directionnelle claire par rapport à ces directions critiques.



Anglais	Français
$Z_2 - Z_1 = \text{terrain variation}$	$Z_2 - Z_1 = \text{variation du terrain}$
Best fit passing through base of wind turbine	Plan idéal passant par la base de l'éolienne
Terrain profile	Profil du terrain

Figure B.2 – Exemple de détermination de la pente et de la variation du terrain par rapport au plan idéal pour la distance "2L à 4L" et le cas "secteur de mesure" (Tableau B.1, ligne 2)

NOTE 1 Cette figure ne représente qu'une direction. Toutes les directions dans les limites du secteur de mesure sont prises en compte pour le calcul du plan le mieux adapté, puis la variation maximale du terrain par rapport à ce plan est déterminée en analysant toutes les directions, comme représenté plus haut.



Anglais	Français
SLOPE	PENTE
Terrain profile	Profil du terrain

Figure B.3 – Détermination de la pente pour les distances "2L à 4L" et "8L à 16L" et le cas "à l'extérieur du secteur de mesure" (Tableau B.1, ligne 3 et ligne 5)

NOTE 2 Cette figure ne représente qu'une direction. Toutes les directions à l'extérieur du secteur de mesure sont analysées de la même manière; le résultat le plus défavorable (c'est-à-dire, la pente la plus élevée) est envisagé.

Annexe C (normative)

Procédure d'étalonnage du site

C.1 Généralités

Un étalonnage du site quantifie et, éventuellement, réduit les effets du terrain sur la mesure de performance de puissance. Le terrain peut provoquer une différence systématique de la vitesse du vent entre l'emplacement du mât météorologique auquel l'anémomètre de performance de puissance est monté et la hauteur équivalente au-dessus du sol au centre du rotor à l'emplacement de l'éolienne. En outre, la relation entre la vitesse du vent au niveau du mât météorologique de référence et la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne peut également être affectée par les variations de stabilité atmosphérique et/ou le profil de cisaillement. Le cisaillement du vent, c'est-à-dire la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur par rapport au sol, peut également être un paramètre d'influence sur cette relation. En effet, différents profils de cisaillement peuvent provoquer une relation différente entre les points de mesure, notamment si l'éolienne et le mât météorologique présentent différentes altitudes.

Considérations saisonnières: la stabilité atmosphérique, les turbulences et le cisaillement du vent peuvent varier en fonction des conditions saisonnières. Les effets des variations de la rugosité dues aux modifications de la végétation dans la surface d'essai ou directement provoquées par différentes caractéristiques saisonnières de surface (eau/sol par rapport à glace/sol, neige, cultures, etc.) posent également problème. Par conséquent, il convient de réaliser l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance pendant la ou les mêmes saisons. Si les mesures sont réalisées lors de différentes saisons, une incertitude supplémentaire doit être appliquée de la manière décrite à l'Article C.7.

Les résultats de l'étalonnage du site sont les suivants:

- a) un tableau des corrections de l'écoulement pour toutes les directions du vent dans le ou les secteurs de mesure; et
- b) une estimation de l'incertitude-type de ces corrections de l'écoulement.

L'étalonnage du site peut être évalué à l'aide de deux méthodes distinctes. Une seule méthode est exigée. Cette méthode est choisie en analysant les données permettant d'évaluer le cisaillement (voir C.5.1). Pour chaque méthode, les résultats sont les suivants:

- 1) Paragraphe C.5.2 – Etalonnage du site compte tenu du cisaillement: les corrections de l'écoulement sont représentées par une matrice des tranches de direction du vent et des tranches de cisaillement du vent dans laquelle un facteur de correction unique du rapport de vitesses du vent est calculé pour chaque point de la matrice;
- 2) Paragraphe C.5.3 – Etalonnage du site lorsque le cisaillement n'a pas une influence significative: les corrections de l'écoulement sont représentées par une pente et une valeur d'ordonnée à l'origine pour chaque tranche de direction du vent. Le coefficient de détermination, r^2 , à savoir la valeur de la régression, doit également être consigné.

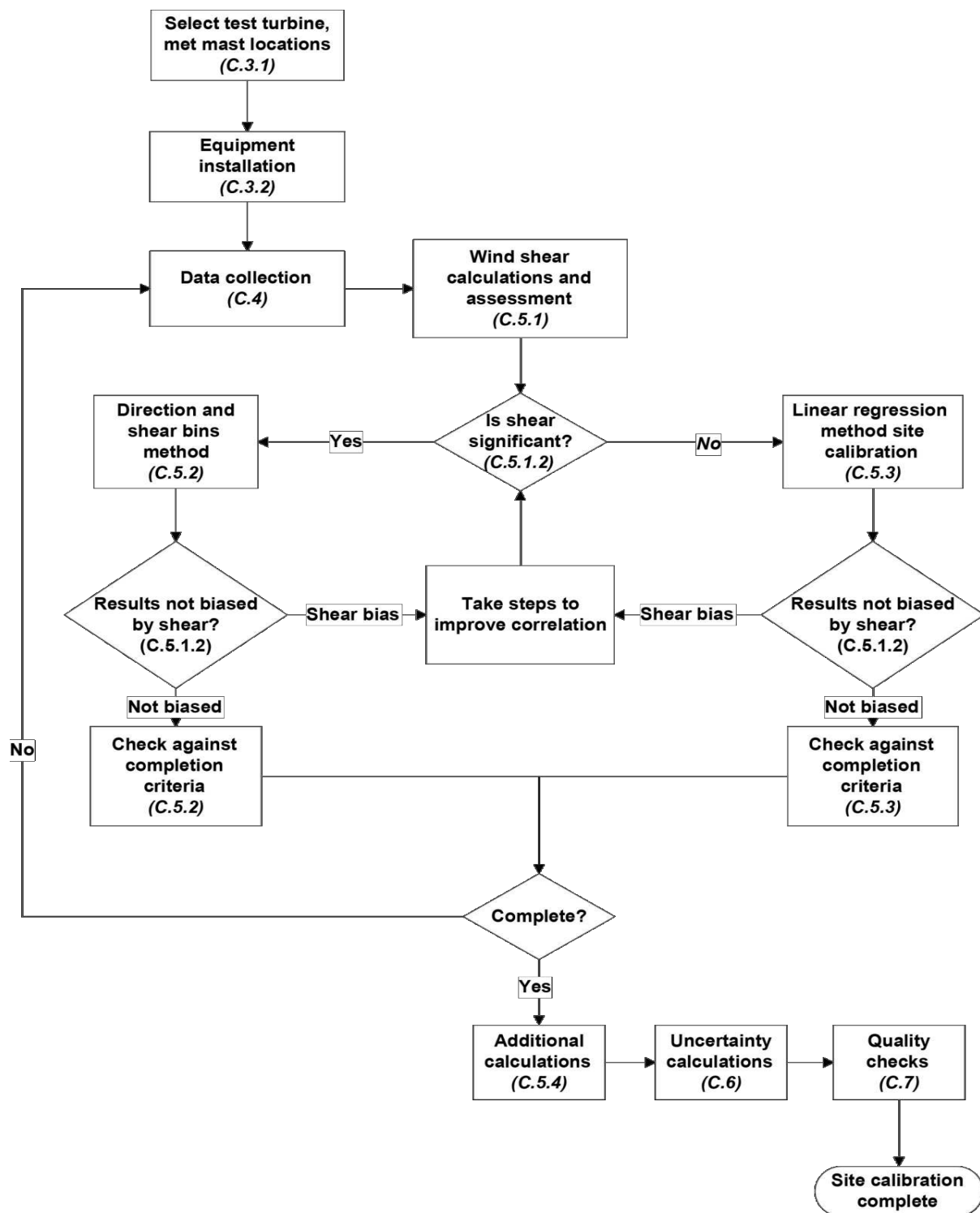
Cette procédure est donnée pour la vitesse du vent définie comme la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Ainsi, la procédure n'impose pas de mesures à la hauteur de l'extrémité supérieure du mât météorologique, qui impliquent un coût élevé et qui peuvent ne pas être pratiques car les dispositifs de télédétection peuvent ne pas être adaptés pour des mesures sur un terrain complexe. Cependant, lorsqu'une courbe de puissance doit être déduite pour la définition de la vitesse du vent comme REWS, la procédure est répétée pour chaque paire de hauteurs de mesure et non pour la hauteur du moyeu de chaque mât météorologique uniquement.

C.2 Vue d'ensemble de la procédure

Avant l'installation de l'éolienne (ou après son enlèvement si elle existait déjà), deux mâts météorologiques doivent être érigés. L'un des mâts météorologiques est le mât météorologique à l'emplacement de référence. Il sera également utilisé pour l'essai de performance de puissance. Le second mât météorologique est un mât météorologique représentant l'éolienne et se situe à l'emplacement de l'éolienne.

Cette procédure vise à caractériser la corrélation des vitesses du vent entre ces deux emplacements. Des recommandations supplémentaires pour le choix de ces emplacements sont données en C.3.1.

L'organigramme de la Figure C.1 fournit une vue d'ensemble générale du processus de préparation et d'analyse.



IEC

Anglais	Français
Select test turbine, met mast locations (C.3.1)	Choix de l'éolienne d'essai et de l'emplacement du mât météorologique (C.3.1)
Equipment installation (C.3.2)	Installation du matériel (C.3.2)
Data collection (C.4)	Collecte des données (C.4)
Wind shear calculations and assessment (C.5.1)	Évaluation et calculs du cisaillement du vent (C.5.1)
Is shear significant? (C.5.1.2)	Le cisaillement est-il significatif? (C.5.1.2)
Yes	Oui

Anglais	Français
No	Non
Direction and shear bins method (C.5.2)	Méthode des tranches de direction et de cisaillement du vent (C.5.2)
Linear regression method site calibration (C.5.3)	Etalonnage du site selon la méthode de régression linéaire (C.5.3)
Results not biased by shear? (C.5.1.2)	Les résultats sont-ils polarisés par le cisaillement? (C.5.1.2)
Shear bias	Polarisation due au cisaillement
Take steps to improve correlation	Etapes à suivre pour améliorer la corrélation
Shear bias	Polarisation due au cisaillement
Results not biased by shear? (C.5.1.2)	Les résultats sont-ils polarisés par le cisaillement? (C.5.1.2)
Not biased	Pas de polarisation
Check against completion criteria (C.5.2)	Contrôler par rapport aux critères d'achèvement (C.5.2)
Check against completion criteria (C.5.3)	Contrôler par rapport aux critères d'achèvement (C.5.3)
Complete?	Terminé?
Additional calculations (C.5.4)	Calculs supplémentaires (C.5.4)
Uncertainty calculations (C.6)	Calculs d'incertitude (C.6)
Quality checks (C.7)	Contrôles de la qualité (C.7)
Site calibration complete	Etalonnage du site terminé

Figure C.1 – Organigramme d'étalonnage du site

C.3 Montage d'essai

C.3.1 Considérations relatives au choix de l'éolienne à l'essai et de l'emplacement du mât météorologique

Le mât météorologique de référence doit être le mât météorologique utilisé pour la mesure de la courbe de puissance. Le mât météorologique représentant l'éolienne doit être situé aussi près que possible de l'emplacement auquel l'éolienne à l'essai sera ou a été placée. Il doit se trouver à $0,2 H$ ou moins de l'axe central de l'éolienne, H étant la hauteur du moyeu de l'éolienne. Il est recommandé que l'éolienne et les mâts météorologiques de référence soient du même type et disposent de la même géométrie de flèche afin d'obtenir des effets de montage similaires sur le matériel de mesure du vent.

Plusieurs facteurs peuvent affecter l'étalonnage du site. Les facteurs les plus importants sont le terrain, l'emplacement du mât météorologique et les conditions atmosphériques, notamment le cisaillement du vent, les turbulences et la stabilité. Ils peuvent varier de manière significative d'un emplacement à un autre, mais sont souvent corrélés entre eux.

Il convient de choisir l'emplacement de l'éolienne à l'essai de manière à optimiser la collecte de données valides et à favoriser la corrélation entre les mâts météorologiques de référence et représentant l'éolienne. L'objectif de l'étalonnage du site est de mesurer les variations intervenant dans la couche limite, car le vent suit l'orographie du terrain, qui est généralement un écoulement associé, alors que les obstacles produisent davantage de sillages turbulents, lesquels sont affectés par les bords saillants et les surfaces verticales qui peuvent entraîner une séparation de l'écoulement. En outre, certaines particularités de terrains, comme les falaises ou les collines pentues, peuvent également provoquer une séparation de l'écoulement et ainsi entraîner une faible corrélation. A titre indicatif, il convient de prendre en considération le type de terrain lors du choix des emplacements de l'éolienne à l'essai et du mât météorologique de référence. Les types de terrains dont il est question dans le présent document constituent des descriptions informatives et qualitatives destinées à apporter une aide dans le choix des emplacements de l'éolienne à l'essai et du mât météorologique de

référence, ainsi qu'à fournir des informations sur ce à quoi il faut s'attendre lors de la réalisation de mesures sur ces types de terrains. Des exemples de ces types de terrains sont donnés à la Figure C.2.

Type A:

Le terrain de type A est le type de terrain le moins complexe. En règle générale, un site de type A ne présente pas de variations significatives d'altitude par rapport à la hauteur du moyeu de l'éolienne ou de pentes particulièrement raides sur de longues distances. Les terrains qui satisfont aux exigences de l'Annexe B, les collines en pente douce et éventuellement les éoliennes situées sur une crête située face à une plaine sont des exemples de terrains de type A.

Lorsque des étalonnages sont réalisés sur des sites de type A, les conditions de cisaillement du vent à l'emplacement du mât météorologique de référence peuvent être différentes des conditions de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne. Le cas échéant, les résultats d'étalonnage du site seront susceptibles de dépendre du cisaillement et de la direction du vent.

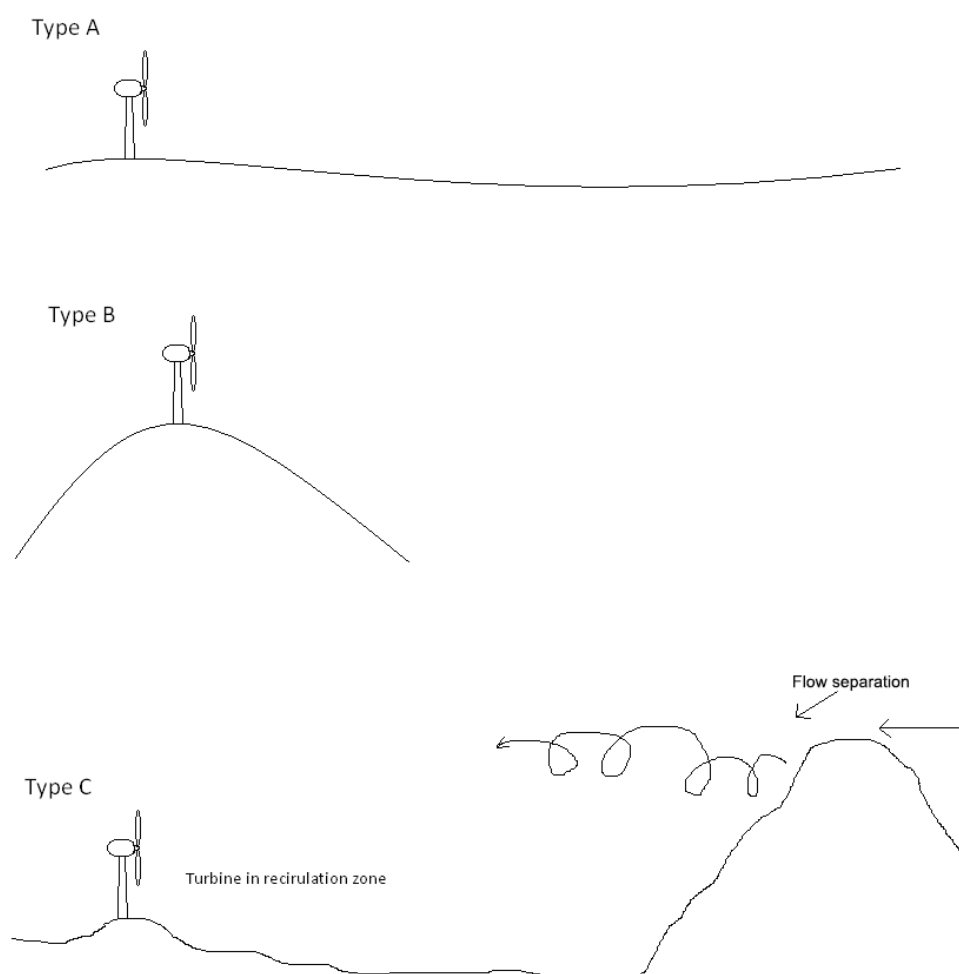
Type B:

Le terrain de type B correspond à un terrain de complexité modérée à élevée. Les terrains de type B incluent les montagnes, les bords de crêtes, les grandes collines et les sites vallonnés avec des pentes modérées à raides. Ils présentent des variations significatives d'altitude par rapport à la hauteur du moyeu de l'éolienne. En règle générale, le cisaillement du vent sur des sites de type B est faible et relativement constant, bien qu'il puisse parfois être négatif. Par conséquent, il n'est pas prévu que le cisaillement du vent constitue un facteur aussi significatif que pour les sites de type A. Néanmoins, les résultats d'étalonnage sur les sites de type B dépendent souvent à la fois de la vitesse et de la direction du vent, en particulier si la différence d'altitude entre le mât météorologique de référence et l'éolienne à l'essai est supérieure à 10 m. Une correction de régression linéaire est donc fréquemment appropriée pour les sites de type B.

La composante écoulement ascendant/vitesse verticale du vent qu'impliquent les terrains de type B peut avoir un impact considérable sur l'incertitude, en fonction de la réponse des anémomètres à l'écoulement ascendant. Une mesure de la vitesse verticale du vent peut servir à évaluer l'angle d'écoulement ascendant, qui peut ensuite être utilisé en association avec le rapport de classification des anémomètres dans le but de calculer les caractéristiques d'exploitation d'un anémomètre de type S avec des plages des paramètres d'influence définies par les utilisateurs et décrites à l'Article I.3.

Type C:

Les terrains de type C sont les terrains les plus extrêmes du point de vue de la réalisation de mesures. Les sites de type C présentent généralement un élément de terrain pentu (p. ex.: montagne ou canyon) qui peut provoquer la séparation de l'écoulement directement du côté exposé au vent de l'éolienne à l'essai et créer une zone de recirculation à son emplacement. L'ampleur de la séparation de l'écoulement est définie par cet élément de terrain et peut perturber la corrélation de la vitesse du vent entre l'éolienne à l'essai et le mât météorologique de référence, même si l'élément de terrain est situé à une distance de plus de $16L$ de l'éolienne à l'essai. En règle générale, le terrain de type C est si complexe que la corrélation entre les vents au niveau du mât météorologique de référence et de l'éolienne à l'essai peut être faible. Les corrections de l'écoulement peuvent différer de manière significative entre les tranches adjacentes de direction du vent. Une attention particulière doit être prêtée au choix des éoliennes à l'essai pour les emplacements situés sur des terrains de type C dans le sens où les données seront généralement très dispersées et présenteront une grande incertitude de résultat.



IEC

Anglais	Français
Type A	Type A
Type B	Type B
Type C	Type C
Flow separation	Séparation de l'écoulement
Turbine in recirculation zone	Eolienne située dans une zone de recirculation

Figure C.2 – Types de terrains

Afin d'améliorer la corrélation, il convient de placer le mât météorologique de référence de façon à ce qu'il ait une altitude et des conditions de vent similaires à celles de l'éolienne à l'essai. Par exemple, si l'éolienne à l'essai est située sur une crête, il est recommandé de positionner le mât météorologique de référence sur cette crête à côté de l'éolienne plutôt qu'à une altitude inférieure face à l'éolienne.

C.3.2 Instrumentation

Le montage d'essai exige au minimum la réalisation des mesures de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, de la direction du vent à proximité de la hauteur du moyeu et du cisaillement du vent au niveau des deux mâts météorologiques conformément à 7.2.8.

Le WME utilisé pour l'étalonnage du site doit satisfaire aux exigences de 7.2 et suivre les lignes directrices relatives au montage données à l'Annexe G. Les anémomètres doivent être du même type, présenter des caractéristiques d'exploitation identiques et doivent également

être étalonnés dans la même soufflerie. Les anémomètres doivent être du même type et présenter des caractéristiques d'exploitation identiques pour la mesure de la courbe de puissance et pour l'étalonnage du site.

En fonction des caractéristiques du site, des mesures supplémentaires sont recommandées afin de fournir davantage d'informations sur les conditions du site. Elles ne sont par conséquent pas normatives. Ces mesures peuvent également être utilisées pour améliorer la qualité générale de l'étalonnage du site et de la mesure de la courbe de puissance en identifiant des conditions atmosphériques inhabituelles qui se corréleront avec les valeurs aberrantes ou peuvent être utilisées pour déterminer une classification pertinente des instruments et, en association avec le rapport de classification correspondant, quantifier l'incertitude-type des caractéristiques d'exploitation des anémomètres spécifiques au site:

- a) Une mesure de la vitesse verticale du vent (p. ex.: avec un anémomètre à ultrasons 3D) est recommandée dans les 10 % de la hauteur du moyeu ou dans les 5 m de la hauteur du moyeu pour les petites éoliennes afin de ne pas enfreindre les exigences de montage des capteurs montés en tête de mât données à l'Annexe G. Cette mesure peut être utilisée pour déterminer la classe pertinente pour la classification des instruments et, en association avec le rapport de classification correspondant, pour quantifier l'incertitude due aux caractéristiques d'exploitation, conformément à l'Annexe I.
- b) Une mesure de la déviation de la trajectoire du vent est recommandée pour la direction du vent mesurée au point le plus bas à 10 m ou moins de la mesure de la vitesse du vent à la hauteur de l'extrémité inférieure.
- c) Si des conditions de givrage sont prévues pendant la campagne d'étalonnage du site, un capteur de température ou d'autres moyens de détection du givrage sont recommandés à proximité de la hauteur du moyeu.

De plus, afin d'éviter l'introduction d'une polarisation dans la mesure de la direction du vent en raison de l'incertitude liée à l'installation du capteur de direction du vent, il convient de ne pas retirer le mât météorologique de référence ni son/ses capteurs de direction du vent entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance. Si le capteur principal de direction du vent est enlevé ou remplacé, une composante d'incertitude supplémentaire doit être incluse (voir C.7.4). Si le mât météorologique de référence est retiré puis installé à nouveau entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance, les instruments doivent être montés selon la même configuration et avec des angles de flèche identiques pendant ces deux périodes afin d'obtenir des effets de montage similaires.

C.4 Acquisition de données et critères de rejet

Les données doivent être recueillies en continu à la même fréquence d'échantillonnage que pour l'essai de performance de puissance. Les ensembles de données doivent être fondés sur des périodes de 10 min déduites à partir de données mesurées de façon continue. Pour chaque période de 10 min, la valeur moyenne, l'écart-type, la valeur minimale et la valeur maximale doivent être déduits et stockés.

La taille de la tranche de direction du vent doit être égale à 10°.

Des ensembles de données doivent être rejetés de la base de données dans les circonstances suivantes:

- a) le matériel d'essai est défaillant ou dégradé (par exemple, à cause du givrage);
- b) la direction du vent est en dehors du ou des secteurs de mesure définis en 6.3.3;
- c) la vitesse moyenne du vent sur le mât météorologique représentant l'éolienne est inférieure à 4 m/s ou supérieure à 16 m/s;
- d) toutes les autres conditions atmosphériques particulières dont il s'avère qu'elles influent sur les résultats d'étalonnage du site et qui sont donc choisies comme critères de rejet;

- e) les conditions atmosphériques particulières qui doivent être utilisées comme critères de rejet au cours de l'essai de performance de puissance et dont il s'avère qu'elles influent sur l'étalonnage du site.

Toute condition atmosphérique particulière filtrée pendant l'étalonnage du site doit l'être également pendant l'essai de courbe de puissance.

C.5 Analyse

L'étalonnage du site mesure la relation des vitesses du vent à deux points spécifiques dans l'espace. L'orographie exerce une influence statique sur cette relation (le terrain est fixe dans le temps) alors que le cisaillement du vent lui apporte un élément dynamique, puisque le gradient de la vitesse du vent peut varier de manière significative avec la hauteur, ou peut ne pas varier si le site présente uniquement un cisaillement relativement stable sur une plage limitée.

La première étape du processus d'étalonnage du site consiste donc à évaluer les conditions de cisaillement sur le site. Pour cela, les calculs et tracés de C.5.1 sont réalisés en premier. Ensuite, en fonction des résultats obtenus, C.5.2 ou C.5.3 est appliqué pour calculer les corrections de l'écoulement. A la suite du calcul des corrections de l'écoulement conformément à C.5.2 ou C.5.3, la procédure se poursuit avec les calculs supplémentaires de C.5.4, qui permettront de réaliser les calculs d'incertitude de l'Article C.6 et les contrôles de qualité de l'Article C.7.

C.5.1 Evaluation des conditions de cisaillement du site

C.5.1.1 Calculs et tracés de caractérisation du cisaillement

Pour chaque point de données sur 10 min, les calculs suivants doivent être effectués:

- a) le rapport de vitesses du vent, soit la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à l'emplacement de l'éolienne divisée par la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à l'emplacement du mât météorologique de référence;
- b) l'exposant de cisaillement aux deux mâts météorologiques, qui doit être calculé à l'aide de la loi exponentielle (voir 3.31);
- c) l'heure du jour selon un système horaire sur 24 h, qui doit être déterminée à partir de l'horodatage et de tout décalage par rapport à l'heure locale du site. Tout réglage des horloges locales pour passer de l'heure d'été à l'heure d'hiver (avancement d'une heure pour l'heure d'été) doit être consigné s'il est appliqué aux horodatages de l'enregistreur de données.

La méthode d'analyse doit dépendre de la détermination ou non du cisaillement du vent comme un facteur significatif sur le site. Un cisaillement élevé, ou plus spécifiquement une large plage de valeurs de cisaillement, est généralement provoqué par un cycle diurne avec une atmosphère stable la nuit et une atmosphère instable au cours de la journée. A des fins de représentation des conditions de cisaillement sur le site et d'aide à l'évaluation du cisaillement, les diagrammes de dispersion suivants doivent être générés pour les données de l'emplacement de l'éolienne ainsi que de l'emplacement du mât météorologique de référence à partir de la base de données filtrée:

- 1) diagramme de dispersion de l'exposant de cisaillement du vent par rapport à l'heure du jour;
- 2) diagramme de dispersion de l'exposant de cisaillement du vent par rapport à la direction du vent;
- 3) diagramme de dispersion de l'exposant de cisaillement du vent par rapport à la vitesse du vent;
- 4) diagramme de dispersion de la vitesse du vent par rapport à l'heure du jour.

Il est à noter qu'il convient d'utiliser l'heure du jour avec précaution. L'objectif réel est de prendre en compte les heures de lever et de coucher du soleil locales, car celles-ci influencent fortement la stabilité atmosphérique. Or, en particulier pour les ensembles de données les plus longs et les latitudes les plus élevées, la corrélation entre le lever du soleil, le coucher du soleil et l'heure du jour est assez faible.

En règle générale, pour un site sur lequel ces effets se produisent, les exposants de cisaillement observés au cours de la journée seront faibles tant que le soleil réchauffe le sol, provoquant des turbulences et un brassage des couches, puis seront élevés la nuit. Par conséquent, une large plage d'exposants de cisaillement ainsi qu'une variation considérable des exposants de cisaillement entre la journée et la nuit peuvent être observées sur ces sites.

C.5.1.2 Evaluation de l'importance du cisaillement

Indépendamment de la stabilité atmosphérique, le cisaillement doit être considéré comme un facteur significatif si plus de 25 % des points de données affichent un exposant de cisaillement supérieur à 0,25.

Il doit être confirmé que le cisaillement est un paramètre significatif si la corrélation avec la vitesse du vent s'améliore après la répartition en tranches en fonction de la direction et du cisaillement conformément à la Méthode 1 de C.5.2. A défaut, l'étalonnage du site peut être évalué d'après la Méthode 2 décrite en C.5.3 (méthode de régression linéaire).

La division du secteur de mesure pour permettre l'application de méthodologies différentes à divers secteurs est admise. Elle peut être utile si, par exemple, le terrain d'une partie du secteur de mesure est de type A, mais correspond au type B en provenance d'une autre direction.

L'objectif est de garantir que l'étalonnage du site n'est pas polarisé par des conditions de cisaillement inhabituelles. En effet, soit la méthode d'étalonnage du site tient compte de l'impact du cisaillement, soit les conditions peu communes sont filtrées. Les résultats de l'étalonnage du site effectué à l'aide de la méthode de C.5.2 ou de C.5.3 peuvent être évalués avec la méthode de C.5.4, laquelle applique les corrections d'étalonnage du site à la vitesse du vent au niveau du mât permanent avant de réaliser une comparaison avec la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne. La comparaison entre les résidus d'étalonnage du site et le cisaillement du vent ou d'autres indicateurs de stabilité atmosphérique révélera si la méthode choisie corrige avec précision la vitesse du vent à l'emplacement permanent, quelles que soient les conditions, ou si des actions supplémentaires sont nécessaires pour améliorer sa qualité et réduire l'incertitude. Plus spécifiquement:

- a) il convient que le paramètre de cohérence interne (Equation (C.3) en C.5.4) moyenné par tranche de vitesse du vent soit compris entre 0,98 et 1,02 dans la plage de valeurs de 4 m/s à 16 m/s au sein de chaque secteur;
- b) il convient qu'une régression linéaire de $V_{\text{Turb\_predicted}}$ (Equation (C.1)) par rapport à $V_{\text{Turb\_measured}}$ ait une valeur de $R^2 > 0,95$ au sein de chaque secteur.

C.5.1.3 Etablissement d'une corrélation du cisaillement entre les emplacements

S'il est établi que le cisaillement est significatif sur le site et s'il existe une exigence imposant de filtrer le cisaillement à l'emplacement de l'éolienne, alors il doit être établi que le cisaillement à l'emplacement de l'éolienne peut être prédit à partir du cisaillement mesuré à l'emplacement du mât météorologique de référence. Pour cela, la méthode la plus simple consiste à établir le tracé du cisaillement à l'emplacement de l'éolienne par rapport au cisaillement à l'emplacement du mât de référence, puis à appliquer la méthode de régression linéaire des moindres carrés ordinaires. Cela doit être effectué à l'aide de la base de données filtrée. Il est à noter que cette régression peut être utilisée pendant la mesure de la courbe de puissance dans le but de prédire le cisaillement à l'emplacement de l'éolienne.

Si le cisaillement à l'emplacement de l'éolienne et le cisaillement à l'emplacement du mât de référence ne sont pas corrélés dans tous les cas, des actions supplémentaires doivent être

entreprises pour que les données soient systématiquement corrélées. Par exemple, une non-corrélation peut apparaître lorsqu'une différence significative d'altitude entre l'emplacement du mât de référence et celui de l'éolienne à l'essai est observée en association avec un cisaillement élevé, lui-même souvent corrélé avec l'heure du jour. Le cas échéant, la méthode suggérée pour obtenir des résultats corrélés consiste à filtrer les données en fonction de l'heure du jour afin de supprimer les données de cisaillement élevé relevées pendant la nuit, bien que d'autres méthodes de suppression des données non corrélées soient admises. Le filtre de l'heure du jour peut être établi à partir des tracés de l'exposant de cisaillement en fonction de l'heure du jour. Différentes méthodes, entre autres la réduction du secteur de mesure visant à étudier uniquement les directions présentant des conditions d'écoulement similaires, le filtrage ou le fractionnement de l'étalonnage du site en fonction des saisons, peuvent être utilisées pour obtenir un ensemble de données parfaitement corrélé. Les tracés de l'exposant de cisaillement du vent en fonction de la direction du vent peuvent être utiles pour déterminer les secteurs à utiliser.

Chaque filtre supplémentaire appliqué aux résultats de l'étalonnage du site doit également être appliqué lors de la mesure de la courbe de puissance. Si un filtre de l'heure du jour est utilisé, il peut être ajusté en fonction des saisons afin de tenir compte de la longueur des jours, à savoir plus longs en été et plus courts en hiver. Il convient de n'utiliser que les données correspondant au mât de référence pour tous les filtres supplémentaires, car les données à l'emplacement de l'éolienne ne pourront pas être filtrées lors de la mesure de la courbe de puissance.

Le cisaillement, les turbulences et la vitesse du vent sont souvent corrélés. Les tracés de l'exposant de cisaillement du vent par rapport à la direction du vent, de l'exposant de cisaillement du vent par rapport à la vitesse du vent et de la vitesse du vent par rapport à l'heure du jour peuvent être utilisés pour évaluer l'impact potentiel de ces filtres sur les données de la courbe de puissance en ce qui concerne les données réduites à des vitesses du vent spécifiques. Par exemple, si l'application d'un filtre de l'heure du jour entraîne la perte de la plupart des données pour des vitesses élevées du vent, ce filtre peut ne pas être pratique. En dernier recours, une solution pourrait consister à réaliser plusieurs étalonnages du site, chacun d'entre eux étant valide pour une plage spécifique de conditions atmosphériques.

C.5.2 Méthode 1: tranches de direction du vent et tranches de cisaillement du vent

Pour déterminer si les facteurs de correction de l'étalonnage du site sont influencés par le cisaillement sur le site, les données doivent être réparties en tranches de direction du vent et de cisaillement du vent. La taille des tranches de direction du vent doit être de 10° et ne doit pas être inférieure à l'incertitude du capteur de direction du vent. Les données doivent être filtrées aux limites des extrémités du secteur de mesure. Par exemple, lorsque le secteur de mesure se termine à 43°, l'étalonnage du site à l'extrémité du secteur sera évalué de 35° à 43° uniquement. Le choix de la définition du centre de la tranche de direction (p. ex.: tranches centrées sur des multiples entiers de 10° ou tranches commençant par des multiples entiers de 10°) doit être réalisé de manière cohérente de l'étalonnage du site à l'essai de courbe de puissance. Les tranches de cisaillement du vent doivent augmenter par incréments de 0,05 pour l'exposant de cisaillement et être centrées sur des multiples entiers de 0,05.

Les rapports de vitesses du vent au sein de chaque tranche de direction du vent et de cisaillement du vent doivent être moyennés.

Les critères d'achèvement pour les tranches de direction du vent et de cisaillement du vent sont les suivants:

- a) Au sein de chaque tranche de direction du vent, le nombre total minimal de points de données dans toutes les tranches de cisaillement du vent doit être de 144 (24 h de données). Des tranches de cisaillement du vent incomplètes peuvent être incluses dans ce nombre total. En outre, chaque tranche de direction du vent doit contenir au moins 6 h au-dessus de 8 m/s et 6 h en dessous de cette même valeur.

- b) Chaque tranche de cisaillement du vent au sein d'une tranche de direction du vent complète doit contenir au moins 3 points de données.
- c) Les tranches de cisaillement du vent dans les secteurs de direction du vent incomplets qui contiennent au moins 6 h de données peuvent également être considérées comme complètes.

Après réalisation de la matrice, s'il est observé que les corrections de l'étalonnage du site ne varient pas à mesure que le cisaillement du vent augmente, alors les tranches de cisaillement du vent peuvent être éliminées et les données évaluées sur la seule base d'une tranche de direction du vent, conformément à C.5.3. Le niveau de variation doit être évalué par rapport à l'incertitude statistique de l'étalonnage du site.

Si la variation entre les tranches de cisaillement du vent provoque une variabilité des facteurs de l'étalonnage du site supérieure à deux fois l'incertitude statistique de l'étalonnage du site dans une ou plusieurs tranches de direction du vent, les tranches de cisaillement du vent doivent être incluses dans l'analyse au même titre que les tranches de direction du vent.

Si la variation entre les tranches de cisaillement du vent provoque une variabilité des facteurs de l'étalonnage du site inférieure à deux fois l'incertitude statistique de l'étalonnage du site dans une ou plusieurs tranches de direction du vent, les tranches de cisaillement du vent peuvent être éliminées et les données évaluées sur la seule base de la direction du vent conformément à C.5.3.

Au cours de la mesure de la courbe de puissance, les données doivent être réparties dans des tranches de direction du vent. Pour chaque point de données sur 10 min, l'exposant de cisaillement du vent au niveau du mât de référence doit être calculé. La correction appliquée à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu doit être le rapport de vitesses du vent interpolé à la valeur de cisaillement du vent mesurée à partir des valeurs moyennes de la tranche de cisaillement du vent et de l'exposant de cisaillement du vent mesuré pour cette tranche de direction du vent. L'extrapolation est admise pour les exposants de cisaillement du vent se trouvant dans les dernières tranches de cisaillement complètes. Par exemple, si la dernière tranche de cisaillement complète pour l'étalonnage du site est la tranche de cisaillement de 0,6, une extrapolation est admise pour les valeurs mesurées de l'exposant de cisaillement comprises entre 0,600 et 0,625 (0,625 étant l'extrémité supérieure de la tranche de cisaillement du vent de 0,6, pour une largeur de tranche de 0,05 et une plage de 0,575 à 0,625). L'interpolation entre deux tranches de cisaillement du vent complètes sur une tranche de cisaillement incomplète est admise. L'interpolation entre des tranches de direction du vent n'est pas admise.

C.5.3 Méthode 2: méthode de régression linéaire lorsque le cisaillement n'a pas une influence significative

Les ensembles de données doivent être répartis en tranches de direction du vent. La taille des tranches de direction du vent doit être de 10°. Le choix de la définition du centre de la tranche de direction (p. ex.: tranches centrées sur des multiples entiers de 10° ou tranches commençant par des multiples entiers de 10°) doit être réalisé de manière cohérente de l'étalonnage du site à l'essai de courbe de puissance. Les données doivent être filtrées aux limites des extrémités du secteur de mesure. Par exemple, lorsque le secteur de mesure se termine à 43°, l'étalonnage du site à l'extrémité du secteur sera évalué de 35° à 43° uniquement.

Pour chaque tranche de direction du vent, la méthode de régression linéaire des moindres carrés ordinaires doit être appliquée, la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne étant la variable dépendante et la vitesse du vent de référence étant la variable indépendante. Par conséquent, chaque tranche de direction du vent présentera une pente et une ordonnée à l'origine.

Chaque tranche de direction du vent doit compter un total d'au moins 24 h de données, et doit compter au moins 6 h de données lorsque la vitesse du vent est supérieure à 8 m/s ou inférieure à 8 m/s. Il convient d'étendre la répartition des vitesses du vent au sein de la

tranche afin d'obtenir une bonne corrélation (voir C.7.2). Il est par conséquent recommandé d'utiliser des données relatives aux vitesses du vent allant jusqu'à 11 m/s, voire plus. Il est à noter que les valeurs aberrantes sont fortement pondérées par la méthode de régression linéaire des moindres carrés ordinaires. Il convient d'analyser et de documenter les valeurs aberrantes ayant un impact significatif sur la régression.

Pour représenter la corrélation entre la vitesse du vent à l'emplacement de référence et à l'emplacement de l'éolienne, les tracés suivants doivent être générés pour chaque tranche de direction du vent complète au sein du secteur de mesure:

Vitesse du vent au niveau du mât de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent au niveau du mât de référence, avec indication des coefficients de régression linéaire et de corrélation (communément appelés valeur R^2);

Sur un axe unique, effectuer les tracés ci-après. Un exemple est donné à la Figure C.11 à l'Article C.9:

- rapport de vitesses du vent par rapport à la vitesse du vent de référence;
- moyennes des tranches des rapports de vitesses du vent en tranches de vitesse du vent de 0,5 m/s;
- courbe $y = m + b/x$ où m est la pente de la régression linéaire, b est l'ordonnée à l'origine, x est la vitesse du vent de référence et y est la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne normalisée à la vitesse du vent au niveau du mât de référence, c'est-à-dire $y =$ rapport de vitesses du vent;
- ligne horizontale indiquant la moyenne de tous les rapports de vitesses du vent au sein de la tranche de direction du vent.

C.5.4 Calculs supplémentaires

Les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site doivent être appliquées aux données du mât météorologique de référence pour calculer la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne pour chaque point de données. Cela doit être effectué à l'aide de la base de données filtrée.

$$V_{\text{Turb\_predicted}} = F(WD, \alpha) \times V_{\text{PM}} \quad (\text{C.1})$$

où

$V_{\text{Turb\_predicted}}$	est la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne
$F(WD, \alpha)$	est la correction de l'écoulement dictée par l'étalonnage du site définie en C.5.2;
V_{PM}	est la vitesse du vent au niveau du mât météorologique de référence;
WD	est la tranche de direction du vent;
α	est l'exposant de cisaillement du vent, le cas échéant.

Un résidu d'étalonnage du site doit être calculé de la manière décrite ci-dessous pour chaque point de données sur 10 min. Il correspond à la différence entre la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne et la vitesse du vent mesurée au niveau du mât météorologique représentant l'éolienne.

$$residual = V_{\text{Turb\_predicted}} - V_{\text{Turb\_measured}} \quad (\text{C.2})$$

Un paramètre de cohérence interne doit être calculé de la manière décrite ci-après pour chaque point de données sur 10 min: diviser la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne par la vitesse du vent réelle au niveau du mât météorologique représentant l'éolienne.

$$self\_consistency\_parameter = \frac{V_{Turb\_predicted}}{V_{Turb\_measured}} \quad (C.3)$$

Les résidus et le paramètre de cohérence interne sont utilisés pour évaluer la variation et les éventuelles polarisations des résultats. La moyenne des résidus et le paramètre de cohérence interne reflètent une polarisation moyenne. Les valeurs moyennes respectives de 0 et 1,0 correspondent à une polarisation nulle. L'écart-type de ces paramètres indique la variation de la polarisation moyenne. Il est utilisé pour le calcul de l'incertitude statistique de l'étalonnage du site.

Outre pour le calcul de l'incertitude statistique, qui s'appuie sur la variation d'une polarisation moyenne réputée nulle, ces paramètres sont utilisés pour le calcul de l'incertitude supplémentaire qui doit être ajoutée à certains scénarios énumérés à l'Article C.7. Ces scénarios sont élaborés à partir d'évaluations de la polarisation moyenne estimée qu'ils introduisent, et qui se reflète dans les décalages par rapport à la moyenne de ces paramètres, différant respectivement de 0 et de 1,0.

C.6 Incertitude d'étalonnage du site

C.6.1 Incertitude d'étalonnage du site de catégorie A

C.6.1.1 Analyse par validation croisée en k échantillons de l'étalonnage du site

L'étalonnage du site exploite un modèle de prédiction de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent à l'emplacement du mât météorologique. Pour éviter le risque de sous-estimation de l'incertitude de catégorie A en raison d'un ajustement excessif du modèle aux données, l'incertitude de catégorie A doit être calculée à l'aide de la validation croisée en k échantillons, où $k = 10$. Il est à noter que, dans le secteur éolien, la lettre " k " a différentes significations. Toutefois, son utilisation dans le présent document coïncide avec son utilisation en apprentissage statistique, la méthode appliquée étant appelée *validation croisée en k échantillons*.

L'ensemble final de données filtrées doit être divisé en k échantillons (divisions) de taille égale en fonction de l'horodatage.

Pour chaque échantillon ($k = 1$ à 10):

- a) les corrections d'étalonnage du site doivent être calculées conformément à l'Article C.5, en utilisant uniquement les données des 9 autres échantillons;
- b) les corrections d'étalonnage du site doivent être utilisées pour calculer la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne en utilisant les vitesses du vent mesurées au niveau du mât de référence pour un échantillon k ;
- c) les vitesses du vent prédites à l'emplacement de l'éolienne pour un échantillon k doivent être comparées aux vitesses du vent réelles mesurées au niveau de l'éolienne pour un échantillon k conformément aux paramètres de résidus et de cohérence interne définis en C.5.4;
- d) l'incertitude statistique pour un échantillon k doit être déterminée conformément à C.6.1.2.

L'incertitude totale de catégorie A correspond à la racine carrée de la somme des carrés de l'incertitude calculée pour chaque échantillon divisée par la racine carrée de k .

$$s_{sc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k s_{sc,i}^2}{k}} \quad (C.4)$$

Une valeur de $k = 10$ est choisie afin d'augmenter la probabilité de disposer de suffisamment d'informations dans les ensembles restants pour couvrir la plage de vitesses du vent présente dans l'ensemble de données en cours d'évaluation. Toutefois, d'autres valeurs de k sont admises, du moment que $k \geq 2$.

Les échantillons sont répartis par horodatage plutôt que choisis au hasard. En effet, il est prévu que les variations de relation des vitesses du vent entre les deux emplacements puissent être corrélées avec des événements météorologiques, eux-mêmes corrélés avec le temps. Ainsi, les échantillons répartis en fonction du temps sont plus susceptibles de mieux détecter les variations entre les conditions au cours des périodes d'étalonnage du site et de mesure de la courbe de puissance.

C.6.1.2 Incertitude statistique d'étalonnage du site pour chaque échantillon

Pour chaque échantillon de la validation croisée en k échantillons, l'écart entre la vitesse du vent corrigée après l'étalonnage du site à l'emplacement de l'éolienne et la vitesse du vent mesurée au niveau du mât météorologique représentant l'éolienne est calculé pour chaque période de 10 min. L'écart-type de l'écart de vitesse du vent sur toutes les périodes de 10 min est calculé comme suit:

$$d_{std,k} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (d_{j,k} - \bar{d}_k)^2}{N_k - 1}} \quad (C.5)$$

où

$d_{j,k}$ est le résidu de la j^{e} période de 10 min d'un échantillon k , voir Equation (C.2);

$\bar{d}_k$ est la valeur moyenne des résidus dans un échantillon k ;

N_k est le nombre d'ensembles de données dans un échantillon k ;

$d_{std,k}$ est l'écart-type des résidus d'étalonnage du site pour un échantillon k .

Seules les données qui ont été intégrées à l'évaluation de l'étalonnage du site doivent être incluses dans le calcul de l'écart-type.

L'incertitude-type statistique de catégorie A d'un échantillon k est la suivante:

$$s_{sc,k} = d_{std,k} \cdot \frac{\sqrt{N_k - 1}}{\sqrt{f \cdot N_k}} \quad (C.6)$$

où

f est le nombre de degrés de liberté de l'étalonnage du site.

Le nombre f correspond à la différence entre le nombre de périodes de 10 min incluses dans l'étalonnage du site et le nombre total de paramètres de l'algorithme d'étalonnage du site. Si les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site se présentent sous la forme de rapports de vitesses du vent moyennés par tranche, le nombre de paramètres de l'algorithme d'étalonnage du site par sous-secteur de direction du vent est égal au nombre de

tranches de cisaillement du vent. f correspond alors à la différence entre N_k et le nombre de sous-secteurs de direction du vent (en règle générale, un nombre de secteurs ayant une largeur de 10°). Si les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site se présentent sous la forme de régressions linéaires (pentes et décalages), le nombre de paramètres de l'algorithme d'étalonnage du site est de 2 par sous-secteur de direction du vent. f correspond alors à la différence entre N_k et deux fois le nombre de tranches de direction du vent. Si les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site se présentent sous la forme de rapports de vitesses du vent moyennés par tranche en fonction de la direction du vent et de la tranche de cisaillement du vent, f correspond à la différence entre N_k et la somme des nombres de toutes les tranches de cisaillement du vent dans tous les sous-secteurs de direction du vent.

C.6.2 Incertitude d'étalonnage du site de catégorie B

Il convient de considérer les composantes d'incertitude suivantes comme étant indépendantes les unes des autres lors de l'évaluation de l'incertitude-type composée de catégorie B.

$u_{VT,precal,i}$: Etalonnage de l'anémomètre – l'incertitude-type de l'étalonnage de l'anémomètre doit être issue des étalonnages. Lorsque les étalonnages de l'anémomètre au niveau du mât météorologique de référence et du mât météorologique représentant l'éolienne ont été réalisés dans la même soufflerie, les incertitudes estimées sont dans une certaine mesure corrélées. Il en va de même pour les étalonnages du ou des anémomètres utilisés pour les essais de performance de puissance. Une approche pratique consiste à inclure l'amplitude d'une incertitude d'étalonnage si les étalonnages sont effectués dans la même soufflerie. Lorsque les étalonnages ont été réalisés dans des souffleries différentes ou lorsque différents modèles d'anémomètres sont utilisés, les incertitudes sont indépendantes et doivent être prises en compte en tant que telles.

$u_{VT,class,i}$: Caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre – l'incertitude-type d'exploitation de l'anémomètre au niveau du mât météorologique représentant l'éolienne doit être prise en considération dans les calculs de l'incertitude d'étalonnage du site. La corrélation des caractéristiques d'exploitation au cours de l'étalonnage du site doit être étudiée afin de déterminer dans quelle mesure les incertitudes des caractéristiques d'exploitation au niveau de l'éolienne et de l'anémomètre de référence doivent être prises en considération. En fonction des différences entre les conditions environnementales au cours de la mesure de la courbe de puissance et au cours de l'étalonnage du site, une augmentation de l'incertitude des caractéristiques d'exploitation peut être exigée. Au cours de l'étalonnage du site, il convient de prendre totalement en compte l'incertitude opérationnelle de l'anémomètre de l'éolienne.

$u_{VT,mnt,i}$: Effets de montage – les incertitudes-types de montage de l'anémomètre au niveau du mât météorologique de référence et de l'anémomètre au niveau du mât météorologique représentant l'éolienne doivent être prises en considération dans l'évaluation de l'incertitude d'étalonnage du site.

$u_{dVT,i}$: L'incertitude-type de la vitesse du vent relative au système d'acquisition de données doit être estimée conformément à l'Annexe D et à l'Annexe E.

C.6.3 Incertitude composée

Il convient de considérer les composantes d'incertitude de catégorie A et de catégorie B comme étant indépendantes les unes des autres lors de l'évaluation de l'incertitude composée de l'étalonnage du site.

La restriction du secteur de mesure à des fins de réduction de l'incertitude par élimination des tranches de direction du vent présentant une incertitude plus élevée est admise.

C.7 Contrôles de la qualité et incertitudes supplémentaires

C.7.1 Contrôle de la convergence

Pour chaque tranche de direction du vent, un contrôle de la convergence doit être réalisé à l'aide du paramètre de cohérence interne issu de l'Equation (C.3). Pour cela, le graphique le plus représentatif montre un tracé de la moyenne cumulative du paramètre de cohérence interne par rapport au nombre d'heures par tranche de direction du vent. Il convient de vérifier que les moyennes cumulatives convergent dans les 0,5 % de la moyenne finale pour 16 h de données ou 25 % du nombre total de points de données dans cette tranche (la valeur retenue étant la plus élevée des deux). Si ces critères ne sont pas satisfaits, d'autres actions, par exemple un filtrage supplémentaire, peuvent être appliquées dans le but d'essayer de justifier et de corriger la non-convergence. Si ces actions n'aboutissent pas à une convergence, la vérification de la cohérence interne conformément à l'Article C.8 peut être réalisée au cours de la mesure de la courbe de puissance afin d'évaluer si la non-convergence représente un problème ou non. Si l'essai de courbe de puissance ne satisfait pas aux critères de vérification de la cohérence interne, la tranche doit être exclue du secteur de mesure.

Il convient que la méthode de validation croisée en k échantillons utilisée pour calculer l'incertitude statistique pour l'étalonnage du site reflète une incertitude d'essai plus élevée pour tout cas de non-convergence, afin qu'aucune pénalité d'incertitude ne soit appliquée pour cette vérification.

C.7.2 Contrôle de corrélation pour la régression linéaire (voir C.5.3)

Pour chaque tranche de direction du vent, le niveau de corrélation doit être évalué à partir du coefficient de corrélation de la régression, communément appelé valeur r . Cette évaluation doit être incluse dans le rapport.

C.7.3 Variation de correction entre des tranches de direction du vent adjacentes

Il est recommandé d'éliminer les tranches de direction du vent des secteurs de mesure lorsque les corrections de l'écoulement varient de plus de 2 % entre les tranches adjacentes. Ces variations doivent être évaluées par application de la méthode du paramètre de cohérence interne donnée en C.5.4, de la manière suivante:

- a) évaluer les données et calculer les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site;
- b) créer un décalage des corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site de l'ordre d'un secteur de direction, de manière à ce que les corrections ou régressions de l'écoulement soient appliquées à la tranche adjacente de direction du vent. Par exemple, si la correction de l'écoulement appliquée à la tranche à 290° est $1,024x + 0,1$, appliquer plutôt cette correction à la tranche à 280° ;
- c) en utilisant les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site ajustées à l'étape précédente et les données d'étalonnage du site, calculer la vitesse du vent prédite à l'emplacement de l'éolienne pour chaque période de 10 min, puis calculer le paramètre de cohérence interne avec l'Equation (C.3);
- d) moyenner les paramètres de cohérence interne pour chaque tranche de direction du vent. Si la moyenne est inférieure à 0,98 ou supérieure à 1,02, il convient d'éliminer ces tranches de direction du vent. Si ces tranches de direction du vent ne sont pas éliminées, l'incertitude qu'elles présentent doit être augmentée par la valeur de 1 moins la moyenne du paramètre de cohérence interne multipliée par 100 % et divisée par 2 et la racine carrée de 3. Si cela s'applique à un secteur à partir de ses deux secteurs adjacents, l'augmentation de l'incertitude correspond à la moyenne des deux.

Cette méthode doit être appliquée à la fois par addition et par soustraction à la tranche de direction du vent, en appliquant par exemple les résultats de la tranche à 290° aux deux tranches à 280° et à 300° . Le réglage d'incertitude pour les tranches ne se situant pas à une extrémité doit correspondre à l'impact de déplacement moyen d'une tranche adjacente dans chacune des directions.

$$u_{VT,coc,i,j} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|1 - sccp_{j,j-1}|}{2\sqrt{3}} + \frac{|1 - sccp_{j,j+1}|}{2\sqrt{3}} \right) \quad (C.7)$$

où

- $u_{VT,coc,i,j}$ est l'incertitude-type due à la variation de la correction dans la tranche j de direction du vent;
- $sccp_{j,j-1}$ est le paramètre de cohérence d'étalonnage du site pour la tranche j de direction du vent à l'aide des corrections d'étalonnage du site dans la tranche $j-1$;
- $sccp_{j,j+1}$ est le paramètre de cohérence d'étalonnage du site pour la tranche j de direction du vent à l'aide des corrections d'étalonnage du site dans la tranche $j+1$.

Pour les sous-secteurs situés aux extrémités du secteur de mesure, l'incertitude doit être uniquement évaluée par application de la correction à partir des sous-secteurs adjacents respectifs.

C.7.4 Suppression du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance

Si le capteur de direction du vent est supprimé entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance, une erreur peut être introduite en raison de l'incertitude d'alignement du capteur de direction du vent entre les deux installations. Une composante d'incertitude supplémentaire doit être appliquée pour chaque tranche de direction du vent. Pour chaque tranche de direction du vent, cette composante d'incertitude doit être calculée de la manière suivante:

- Pour chaque tranche de direction du vent, appliquer la méthode décrite en C.7.3, à la différence que l'incertitude sera également appliquée lorsque la moyenne des paramètres de cohérence interne est comprise entre 0,98 et 1,02.
- Déterminer l'incertitude relative des mesures de la direction du vent.
- Multiplier le résultat obtenu au point a) par le rapport entre l'incertitude relative des mesures de la girouette et la taille totale de la tranche de direction du vent.

Par exemple, la girouette présente une défaillance et est remplacée par un modèle similaire entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance. L'incertitude sur les alignements de la girouette est déterminée à 3° et la taille de la tranche est de 10°. Multiplier la variation de la correction entre les tranches adjacentes d'après C.7.3 par $\frac{3}{10}$. Cette incertitude est appliquée en plus de toute incertitude appliquée d'après C.7.3.

$$u_{VT,rmv,i,j} = u_{VT,coc,i,j} \cdot \left(\frac{u_{w,i}}{\text{BinSize}_j} \right) \quad (C.8)$$

où

- $u_{w,i}$ est l'incertitude de direction du vent calculée conformément à l'Article E.12;
- BinSize_j est la taille de la tranche j de direction du vent, par exemple 10°.

Il est à noter que $u_{w,i}$ peut être évaluée sur une base relative, c'est-à-dire que les composantes d'incertitude qui sont entièrement corrélées entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance peuvent être négligées. Par exemple, si le mât

météorologique reste en place et que seul le capteur est remplacé sur la même flèche et monté avec une marque et un modèle identiques, $u_{WVbo,i}$ et $u_{WVoe,i}$ peuvent être négligées.

C.7.5 Etalonnage du site et mesures de performance de puissance lors de différentes saisons

En raison des variations saisonnières des conditions de vent et les variations de rugosité de la surface dues à la végétation, aux précipitations (neige et glace) et au gel de l'eau, les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site peuvent dépendre de la saison. Par conséquent, il est recommandé de réaliser l'étalonnage du site et les mesures de performance de puissance à la même période de l'année, par exemple en été. Pour en évaluer l'impact éventuel, les étapes ci-après doivent être suivies.

Les conditions de vent moyennes au niveau du mât météorologique de référence au cours de l'étalonnage du site (cisaillement du vent, turbulences, écoulement ascendant) doivent être comparées aux conditions de vent moyennes au niveau de ce même mât météorologique au cours de la mesure de performance de puissance pour les directions du vent au sein du secteur de mesure. Une incertitude supplémentaire liée aux variations saisonnières doit être calculée si l'une des conditions suivantes associées à une tranche de direction du vent diffère d'une valeur supérieure aux valeurs indiquées:

- a) 0,05 pour l'exposant de cisaillement du vent;
- b) 3 % pour l'intensité des turbulences;
- c) si l'écoulement ascendant est mesuré, une limite de variation de $\pm 2^\circ$ est recommandée pour l'écoulement ascendant vertical.

L'incertitude supplémentaire liée aux variations saisonnières doit être égale à un tiers de l'amplitude de la correction de l'écoulement dictée par l'étalonnage du site.

C.8 Vérification des résultats

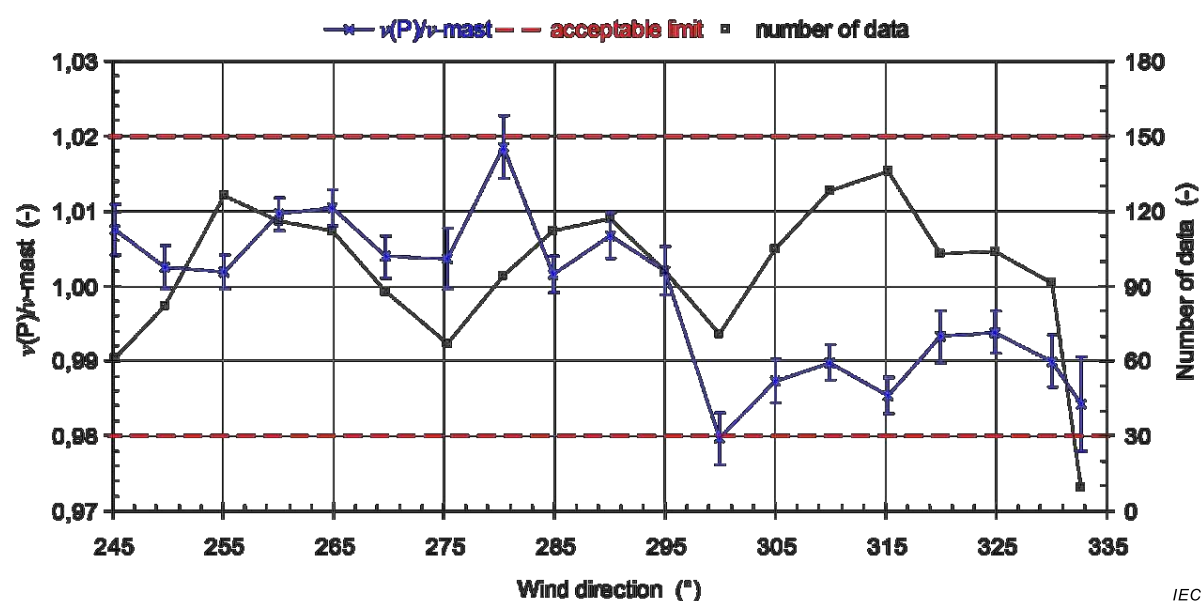
Un exemple de méthode de vérification des résultats à partir d'une mesure de performance de puissance avec ou sans étalonnage du site consiste à utiliser les données mesurées de puissance électrique pour déduire une vitesse du vent représentative pour l'éolienne pour chaque période de 10 min incluse dans la mesure de la courbe de puissance. Cette vitesse du vent est comparée à la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre ou par le RSD. Idéalement, il convient que ce rapport ne varie pas en fonction de la direction du vent. Il convient d'analyser, voire d'exclure, les tranches de direction du vent pour lesquelles le rapport varie fortement. Si la courbe de puissance est fonction de la vitesse du vent équivalente du rotor, il convient d'appliquer ladite vitesse à la vérification de la cohérence interne.

- a) La courbe de puissance inversée est définie comme la vitesse du vent moyennée par tranche en fonction de la puissance de sortie pour les ensembles de données qui ont été utilisés pour l'évaluation de la courbe de puissance. Pour les éoliennes avec contrôle actif, la vitesse du vent normalisée en fonction de la masse volumique de l'air est utilisée pour l'évaluation de la courbe de puissance inversée. Pour les éoliennes avec contrôle non actif, la puissance de sortie normalisée en fonction de la masse volumique de l'air est appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance inversée. Si un étalonnage du site a été réalisé, il convient d'utiliser la vitesse du vent étalonnée du site et, le cas échéant, normalisée en fonction de la masse volumique de l'air pour l'analyse par tranches. Il convient d'inclure les données de puissance aux résultats utilisés lorsque la puissance maximale n'atteint pas la puissance assignée nominale mesurée et lorsque la vitesse du vent normalisée est supérieure à 4 m/s.
- b) La courbe de puissance inversée (RPC, *Reverse Power Curve*) est appliquée pour évaluer la vitesse du vent représentative du rotor de l'éolienne d'après la mesure de la puissance active sur chaque intervalle de 10 min dans lequel l'éolienne à l'essai fonctionne. Pour cela, la vitesse du vent est interpolée de manière linéaire entre les tranches de la RPC conformément à la puissance active mesurée. Le résultat donne la vitesse du vent

représentative du rotor de l'éolienne. Pour les éoliennes avec contrôle actif, le résultat est la vitesse du vent ambiante normalisée en fonction de la masse volumique représentative du rotor de l'éolienne. Pour les éoliennes avec contrôle non actif, il convient d'utiliser la puissance de sortie normalisée en fonction de la masse volumique de l'air pour l'évaluation de la vitesse du vent ambiante.

- c) Il convient de moyenner par tranche le rapport des deux vitesses du vent (déduites/mesurées) en fonction de la direction du vent en secteurs de 5°.
- d) Il est prévu que la vitesse du vent déduite et la vitesse du vent mesurée soient en adéquation pour le secteur de mesure. Ainsi, il convient que le rapport soit proche de l'unité. Des effets du site, des imperfections liées à la procédure d'étalonnage du site ou l'influence des variables environnementales sur la courbe de puissance peuvent donner lieu à des écarts par rapport à l'unité. Les secteurs pour lesquels la vitesse du vent déterminée à l'aide du mât météorologique n'est pas représentative de l'éolienne à l'essai peuvent clairement être identifiés comme des variations du rapport moyenné par tranche. Il convient d'analyser les écarts plus élevés de manière plus approfondie. Il convient d'exclure ces secteurs de l'essai de courbe de puissance final si les effets du site sont identifiés comme à l'origine de ces écarts.
- e) Il convient d'évaluer à nouveau la courbe de puissance pour le secteur restant. La vérification de la cohérence interne peut être répétée avec la RPC recalculée. Il convient que le secteur de mesure soit ajusté, si nécessaire, conformément aux résultats de l'essai répété.

Un exemple de résultat d'essai de vérification est donné à la Figure C.3.



Anglais	Français
$V(P)/v\text{-mast}$	$V(P)/v\text{-mât}$
Acceptable limit	Limite acceptable
Number of data	Quantité de données
$V(P)/v\text{-mast} [-]$	$V(P)/v\text{-mât} (-)$
Wind direction [°]	Direction du vent (°)

Les barres d'erreur indiquent l'incertitude-type de catégorie A sur les rapports moyennés par tranche de v_P et v_{mast} . Les plages acceptables sont les suivantes: rapports de 0,98 à 1,02 pour $L < 3$ diamètres de rotor et rapports de 0,97 à 1,03 pour L compris entre 3 et 4 diamètres de rotor.

Figure C.3 – Exemple de résultats d'essai de vérification

C.9 Exemples d'étalonnage du site

C.9.1 Exemple A

Description du site:

La mesure de la courbe de puissance doit être réalisée sur un site se trouvant en bord de crête (terrain de type B). Le bord de crête est perpendiculaire à la direction du vent de principe face à une plaine et la hauteur de la crête est supérieure d'environ 40 m à 60 m par rapport au plan. La hauteur du moyeu des éoliennes est de 80 m. Elles sont placées sur une seule ligne au sommet de la crête.

Le type de terrain est entre un terrain de type A et un terrain de type B. Le caractère relativement plat du terrain de la crête face au vent implique qu'un cisaillement élevé du vent peut représenter un problème en raison de la stabilité atmosphérique. Cependant, le terrain local des éoliennes s'apparente plus à un site de type B dans lequel des angles d'écoulement ascendant élevés peuvent également poser problème. Les emplacements de l'éolienne à l'essai et du mât météorologique sont donc choisis dans le but de réduire le plus possible l'angle d'écoulement ascendant possible (pente de terrain local plus faible) et la différence d'altitude entre les deux emplacements (ce qui augmentera le plus possible la corrélation des corrections de l'écoulement de la vitesse du vent selon différents profils de cisaillement du vent) en fonction de l'implantation de l'éolienne et des contraintes du terrain.

Montage d'étalonnage du site:

Le mât météorologique de référence est situé sur la crête, à côté de l'éolienne à l'essai mais à une altitude légèrement moins élevée, soit 10 m plus bas environ que l'altitude de l'éolienne.

En plus des anémomètres à coupelles montés côte à côte en tête de mât à la hauteur du moyeu, les mesures du cisaillement du vent sont incluses dans la forme des anémomètres situés à une altitude de 43 m sur les deux mâts météorologiques. Un anémomètre à ultrasons 3D est monté sur chaque mât météorologique pour évaluer les caractéristiques d'exploitation des anémomètres à la hauteur du moyeu afin de quantifier l'incertitude en fonction de la complexité du terrain.

Evaluation de l'étalonnage du site:

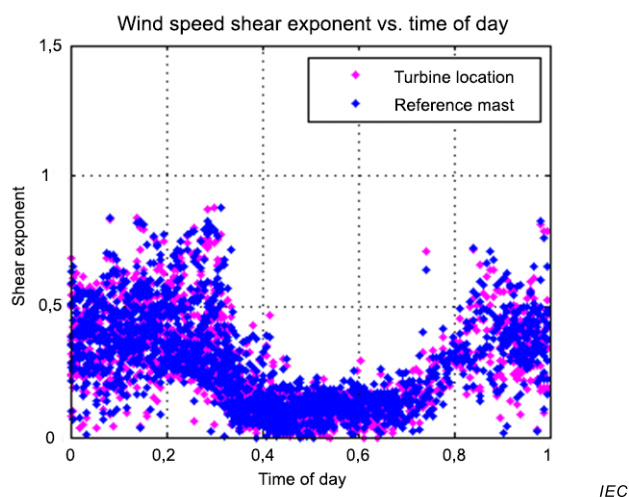
Les données sont recueillies sur plusieurs mois. Les données recueillies sont filtrées en fonction du secteur de mesure, des vitesses du vent allant de 4 m/s à 16 m/s enregistrées au niveau du mât météorologique de référence, du dysfonctionnement du capteur et du givrage de l'anémomètre.

Pour chaque période de 10 min, les éléments suivants sont calculés, conformément à C.5.1:

- a) le rapport entre la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à l'emplacement de l'éolienne et la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à l'emplacement du mât météorologique de référence;
- b) les exposants de cisaillement du vent au niveau de chaque mât météorologique sont calculés à l'aide de la loi exponentielle à l'aide des mesures de la vitesse du vent à 80 m et à 43 m;
- c) une balise représentant l'heure du jour dans un système horaire sur 24 h est calculée à partir de l'horodatage;
- d) l'angle d'écoulement ascendant est calculé à partir des vitesses verticales et horizontales du vent mesurées par les anémomètres à ultrasons au niveau de chaque mât météorologique.

Etape 1: Vérifier l'importance du cisaillement du vent sur le site conformément à C.5.1.2:

Pour les données filtrées, l'exposant de cisaillement du vent au niveau de chaque mât météorologique est tracé par rapport à l'heure du jour.



Anglais	Français
Wind speed shear exponent vs. time of day	Exposant de cisaillement du vent par rapport à l'heure du jour
Turbine location	Emplacement de l'éolienne
Reference mast	Mât de référence
Shear exponent	Exposant de cisaillement
Time of day	Heure du jour

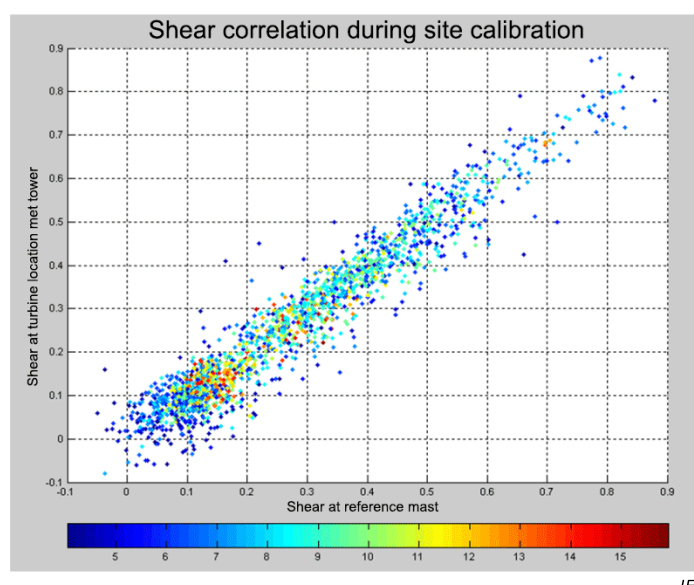
Figure C.4 – Exposant de cisaillement du vent en fonction de l'heure du jour, exemple A

D'après la Figure C.4, il est observé que le cisaillement du vent est élevé la nuit et faible au cours de la journée. Il s'agit d'une situation typique pour un site présentant un cycle diurne de stabilité atmosphérique. La nuit, l'atmosphère forme des couches thermiques (atmosphère stable). Ces couches inhibent les turbulences et entraînent un cisaillement du vent élevé et instable. Au cours de la journée, le soleil réchauffe le sol, ce qui entraîne le brassage des turbulences. Par conséquent, le profil de vitesse du vent est plus uniforme (faible cisaillement du vent) et les turbulences sont plus élevées.

Il apparaît également que les valeurs de cisaillement du vent sont similaires aux emplacements de l'éolienne et du mât météorologique de référence.

Etape 2: Vérifier la corrélation entre le cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne et à emplacement du mât météorologique de référence – Exemple A

L'objectif est de vérifier que les valeurs d'exposant de cisaillement du vent sont corrélées entre les emplacements de l'éolienne et du mât météorologique de référence. Pour cela, un tracé des exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport aux exposants de cisaillement du vent à l'emplacement du mât météorologique de référence est effectué (voir Figure C.5):



IEC

Anglais	Français
Shear correlation during site calibration	Corrélation du cisaillement lors de l'étalonnage du site
Shear at turbine location met tower	Cisaillement à l'emplacement du mât météorologique de référence
Shear at reference mast	Cisaillement au mât de référence

Figure C.5 – Exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à l'emplacement du mât météorologique de référence, exemple A où l'axe de couleur = vitesse du vent (en m/s)

Les exposants de cisaillement du vent à l'emplacement du mât météorologique de référence fournissent une indication relativement bonne des exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne.

Étape 3: Calculer les résultats conformément à C.5.1.3

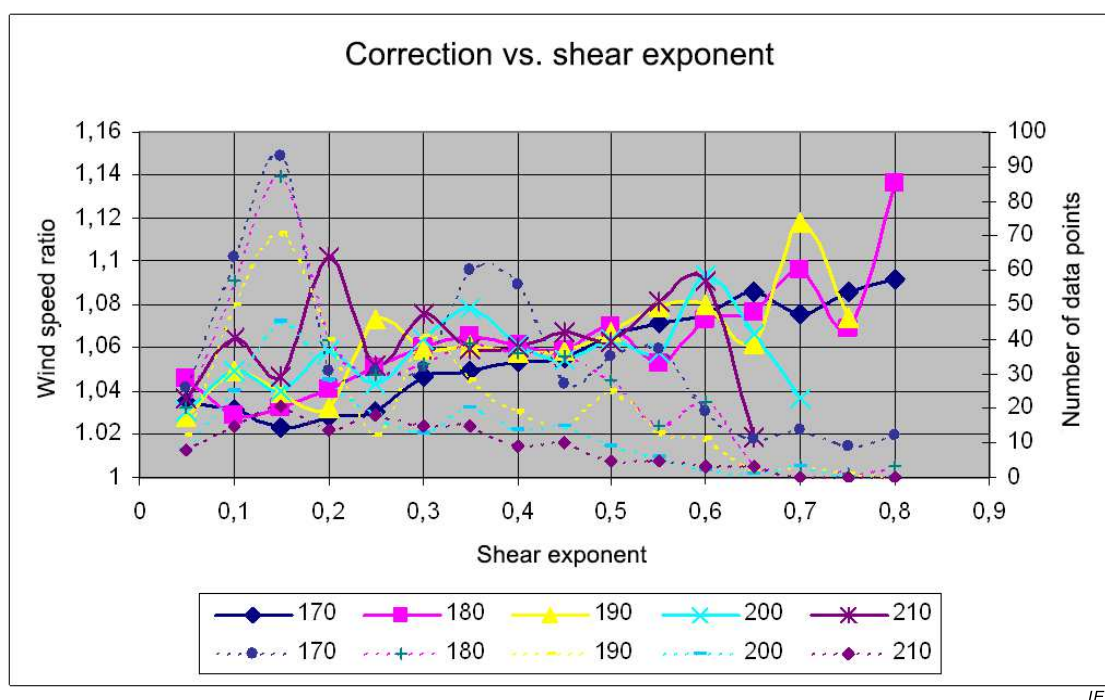
Les calculs suivants sont effectués pour chaque ensemble de données de 10 min, d'après les mesures réalisées au niveau du mât de référence:

- tranches de cisaillement du vent centrées sur des multiples entiers de valeurs de 0,05 de l'exposant de cisaillement du vent $-0,025$ à $0,025$, $0,025$ à $0,075$, $0,075$ à $0,125$, etc.).

A partir de ces calculs, une matrice de l'exposant de cisaillement du vent et de la direction du vent peut être créée. Pour chaque point de ladite matrice, les calculs suivants sont effectués:

- la correction est calculée comme la moyenne des rapports de vitesses du vent dans cette tranche de la matrice;
- le nombre total de points de données valides est calculé au sein de cette tranche de la matrice.

Le Tableau C.1 et le Tableau C.2 donnent respectivement les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site et le nombre de tranches. La Figure C.6 donne une représentation graphique de ces résultats.



Anglais	Français
Correction vs. shear exponent	Correction en fonction de l'exposant de cisaillement
Wind speed ratio	Rapport de vitesses du vent
Number of data points	Nombre de points de données
Shear exponent	Exposant de cisaillement

Figure C.6 – Rapports de vitesse du vent et nombre de points de données en fonction de l'exposant de cisaillement du vent et de la tranche de direction du vent – rapports de vitesse du vent (lignes pleines), nombre de points de données (lignes en pointillés)

Etape 4: Contrôles de la qualité et incertitudes supplémentaires

Incertitude liée aux caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre:

L'angle d'écoulement ascendant a été enregistré, ce qui permet d'estimer l'incertitude liée aux caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre en fonction des conditions du site conformément à C.3.2. L'angle maximal d'écoulement ascendant pour tous les points de données de toutes les tranches de direction du vent était de 3° au niveau du mât météorologique de référence et de 1° à l'emplacement du mât de l'éolienne. Tous les autres paramètres se trouvent dans la plage des caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre de classe A. Par conséquent, l'incertitude liée aux caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre de classe A peut être utilisée pour les deux emplacements. Il s'agit de la classe 1,4A.

**Tableau C.1 – Corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site
(rapport de vitesses du vent)**

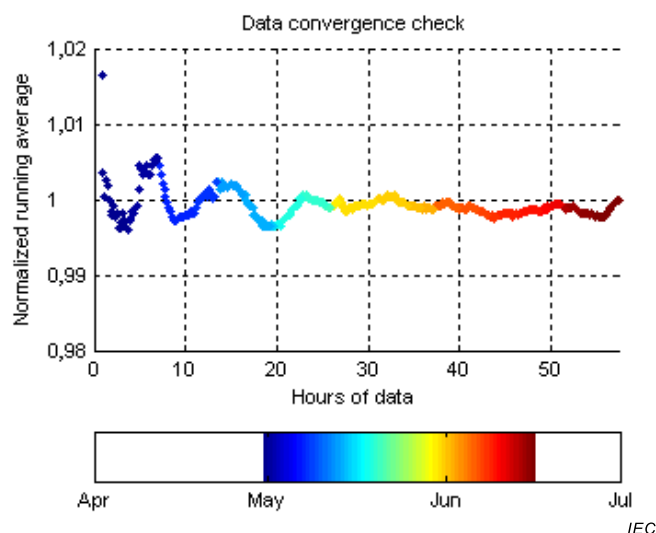
	Tranche de direction du vent				
Tranche de cisaillement du vent	170	180	190	200	210
0,05	1,035	1,046	1,028	1,031	1,037
0,10	1,031	1,029	1,05	1,05	1,064
0,15	1,023	1,033	1,039	1,04	1,047
0,20	1,028	1,041	1,032	1,059	1,102
0,25	1,031	1,051	1,073	1,044	1,052
0,30	1,047	1,06	1,06	1,064	1,076
0,35	1,049	1,066	1,062	1,078	1,06
0,40	1,054	1,061	1,058	1,061	1,06
0,45	1,055	1,058	1,059	1,055	1,067
0,50	1,066	1,07	1,067	1,064	1,063
0,55	1,072	1,053	1,079	1,058	1,081
0,60	1,076	1,074	1,08	INC	1,091
0,65	1,086	1,076	INC	INC	1,019
0,70	1,076	1,096	1,118	INC	INC
0,75	1,086	INC	INC	INC	INC
0,80	1,092	1,136	INC	INC	INC

Tableau C.2 – Nombre de données d'étalonnage du site

	Tranche de direction du vent				
Tranche de cisaillement du vent	170	180	190	200	210
0,05	26	20	12	8	8
0,10	64	57	50	25	15
0,15	93	87	71	45	21
0,20	31	40	40	28	14
0,25	31	30	12	18	18
0,30	32	33	41	13	15
0,35	60	39	28	20	15
0,40	56	36	19	14	9
0,45	27	35	15	15	10
0,50	35	28	25	9	5
0,55	37	15	13	6	5
0,60	19	22	11	2	3
0,65	11	3	2	1	3
0,70	14	3	3	3	0
0,75	9	1	1	0	0
0,80	12	3	0	0	0

Contrôle de la convergence:

Le contrôle de la convergence a démontré que les données ont convergé dans les 0,5 % de la valeur finale (ou entre 0,995 et 1,005 à la Figure C.7 pour la tranche à 190° utilisant plus de 50 h de données dans la tranche satisfaisant à l'exigence), pour 16 h de données ou pour 25 % du nombre total de points de données dans toutes les tranches (la valeur retenue étant la plus élevée des deux).



Anglais	Français
Data convergence check	Contrôle de la convergence des données
Normalized running average	Moyenne d'exploitation normalisée
Hours of data	Heures de données
Apr	Avril
May	Mai
Jun	Juin
Jul	Juillet

Figure C.7 – Contrôle de la convergence des données pour la tranche à 190°

Variation de correction entre les tranches:

L'amplitude de la variation des corrections de l'écoulement était de 0,02 entre toutes les tranches adjacentes.

Ajustement de la girouette:

La girouette n'a pas été ajustée entre les mesures, donc aucune incertitude supplémentaire n'est exigée.

Incertitude saisonnière:

La mesure de la courbe de puissance a été réalisée pendant la même période saisonnière et une comparaison a révélé qu'aucune des variations des conditions n'excédait les limites données en C.7.5, c'est pourquoi aucune incertitude supplémentaire n'est nécessaire pour tenir compte des variations saisonnières.

C.9.2 Exemple B

Description du site:

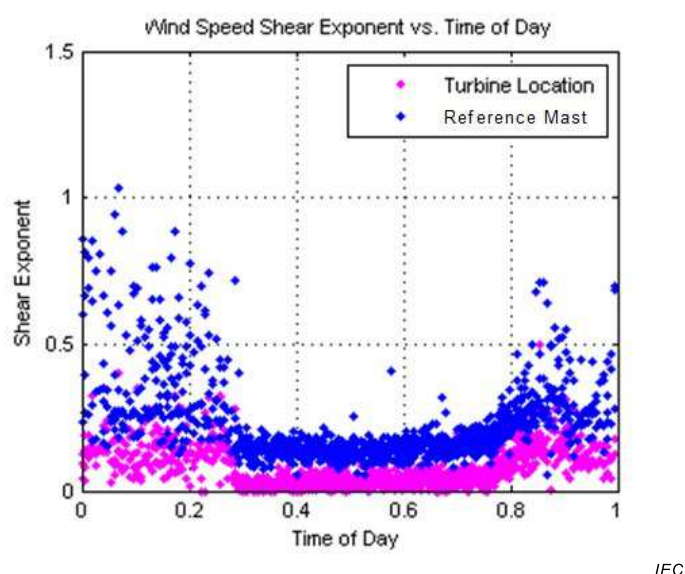
Le site est identique au site de l'exemple A (terrain de type B), à ceci près que le terrain local de l'éolienne est légèrement plus pentu.

Montage d'étalonnage du site:

Contrairement à l'exemple A, le mât météorologique de référence n'a pas pu être localisé sur la crête. Le mât météorologique de référence est situé à la base de la crête (dans la plaine), à 3 diamètres de rotor du côté exposé au vent de l'éolienne à l'essai se trouvant au sommet de la crête. La différence d'altitude entre l'éolienne à l'essai et le mât météorologique de référence est de 45 m.

Etape 1: Vérifier l'importance du cisaillement du vent sur le site

Pour les données filtrées, l'exposant de cisaillement du vent au niveau de chaque mât météorologique est tracé par rapport à l'heure du jour (voir Figure C.8).

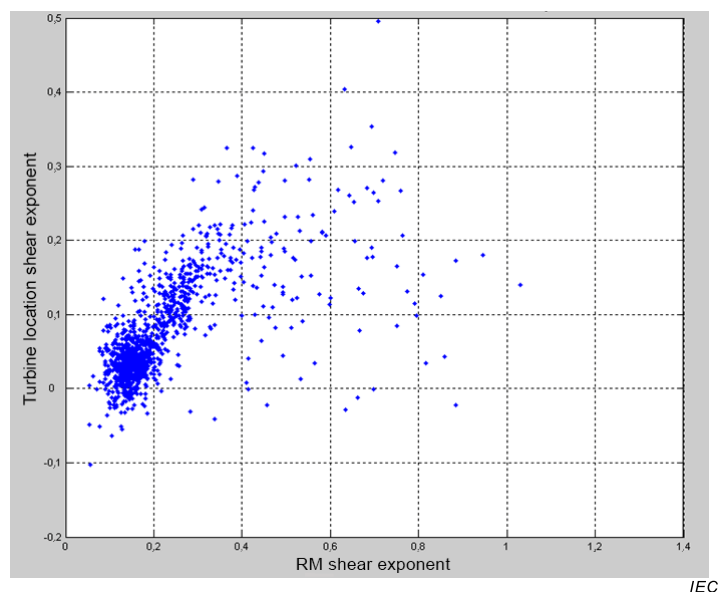


Anglais	Français
Wind speed shear exponent vs. time of day	Exposant de cisaillement de la vitesse du vent en fonction de l'heure du jour
Turbine location	Emplacement de l'éolienne
Reference mast	Mât de référence
Shear exponent	Exposant de cisaillement
Time of day	Heure du jour

Figure C.8 – Exposant de cisaillement du vent par rapport à l'heure du jour, exemple B

Comme pour l'exemple A, le cisaillement du vent est plus élevé la nuit qu'au cours de la journée, ce qui indique un cycle diurne de stabilité atmosphérique. Cependant, le cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne apparaît comme significativement différent du cisaillement du vent au niveau du mât météorologique de référence. Cette différence sera problématique en raison de la variation de l'altitude entre les deux emplacements. Il est raisonnable de prendre pour hypothèse que la relation entre les vitesses du vent à la hauteur du moyeu sera influencée par les variations du profil de cisaillement du vent.

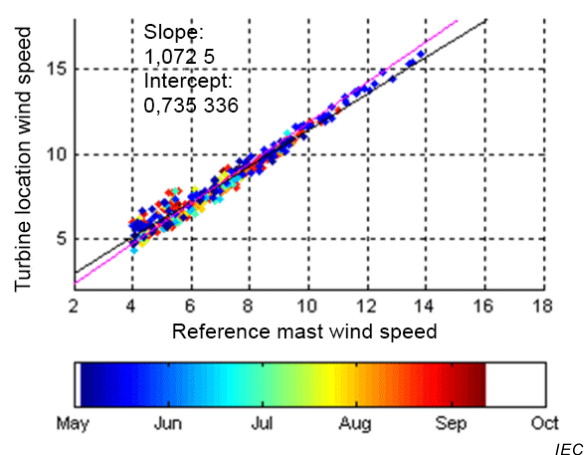
Etape 2: Vérifier la corrélation entre le cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne et à emplacement du mât météorologique de référence – Exemple B



Anglais	Français
Turbine Location Shear Exponent	Exposant de cisaillement à l'emplacement de l'éolienne
RM Shear Exponent	Exposant de cisaillement au niveau du mât météorologique de référence

Figure C.9 – Exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à l'emplacement du mât météorologique de référence, exemple B

Il n'existe pas de corrélation pour les valeurs de cisaillement du vent supérieures à 0,25. Cela suggère que la corrélation des corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site sera incohérente si les conditions atmosphériques sont stables. Pour démontrer/vérifier la véracité de cette hypothèse, les tracés spécifiés en C.5.3 peuvent être utilisés (voir Figure C.10):

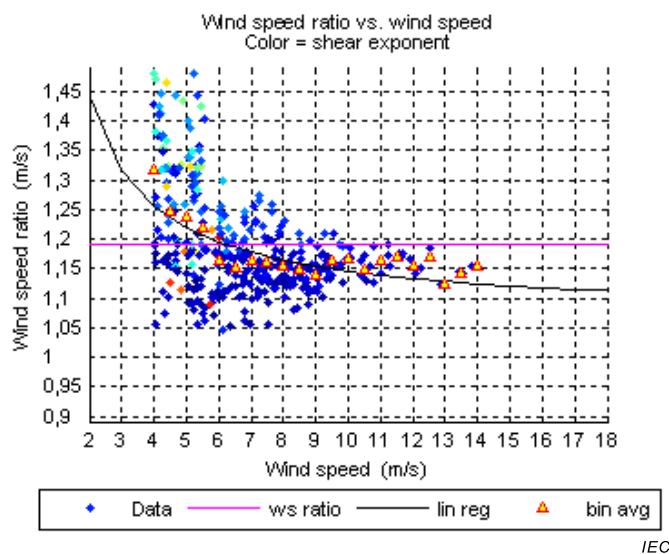


Anglais	Français
Slope: 1,072 5	Pente: 1,072 5
Intercept: 0,735 336	Ordonnée à l'origine: 0,735 336
Turbine location wind speed	Vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne
Reference mast wind speed	Vitesse du vent au niveau du mât de référence
May	Mai
Jun	Juin
Jul	Juillet
Aug	Août
Sep	Septembre
Oct	Octobre

La ligne rouge correspond à la régression linéaire forcée à passer par l'origine (ordonnée à l'origine = 0); la ligne noire correspond à la régression linéaire des deux paramètres (ordonnée à l'origine différente de zéro).

Figure C.10 – Régression linéaire de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu du mât météorologique de référence pour la tranche à 330°

La régression linéaire présente une ordonnée à l'origine significative. En outre, les vitesses du vent les plus faibles sont très dispersées.

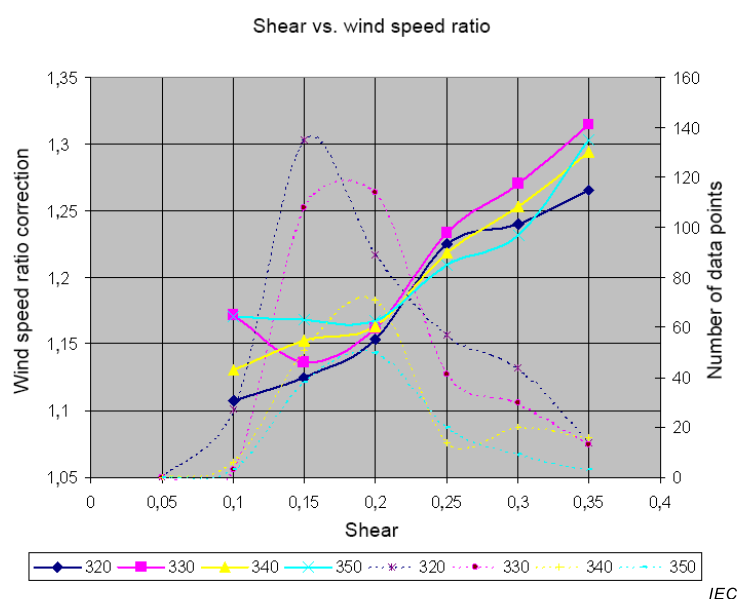


Anglais	Français
Wind speed ratio vs. wind speed Color = shear exponent	Rapport de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent Couleur = Exposant de cisaillement
Wind speed ratio (m/s)	Rapport de vitesses du vent (m/s)
Wind speed (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
Data	Données
Ws ratio	Rapport de la vitesse du vent
Lin reg	Régression linéaire
Bin avg	Moyenne de la tranche

Figure C.11 – Rapports de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent pour la tranche à 330°

Le tracé du rapport de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent (voir Figure C.11) montre une dépendance élevée de la correction de l'écoulement par rapport à la vitesse du vent en raison de l'ordonnée à l'origine élevée. Il est également à noter que l'amplitude générale de la correction de l'écoulement est plutôt élevée, à savoir 19 % en moyenne.

A des fins de représentation, un tracé des rapports de vitesses du vent en fonction du cisaillement du vent pour les différentes tranches de vent est donné à la Figure C.12.



Anglais	Français
Shear vs. Wind Speed Ratio	Cisaillement en fonction du rapport de vitesses du vent
Wind Speed Ratio Correction	Correction du rapport de vitesses du vent
Number of Data Points	Nombre de points de données
Shear	Cisaillement

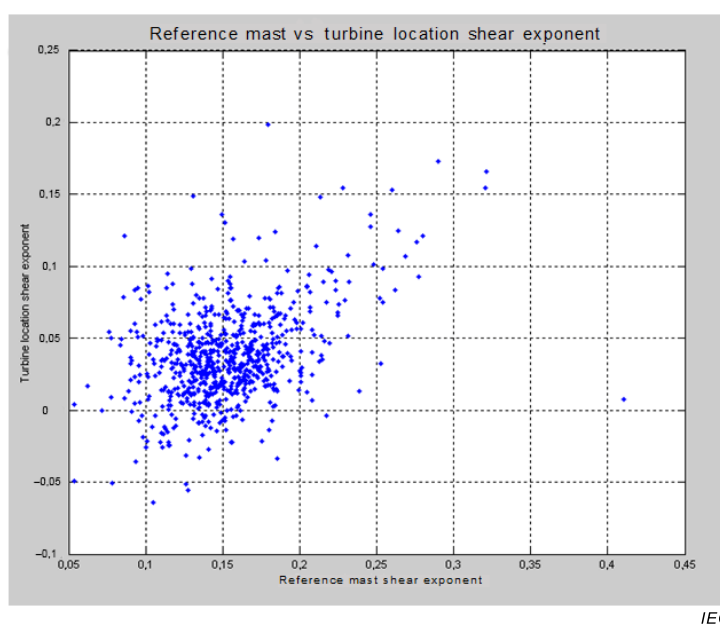
Figure C.12 – Rapports de vitesses du vent en fonction du cisaillement du vent pour la tranche à 330°

Ces tracés sont des représentations utiles de l'impact des conditions du site et du montage d'essai sur l'étalonnage du site. La Figure C.12 montre que la correction varie de plus de 5 % entre 0,20 et 0,25 et la Figure C.9 montre que le cisaillement du vent au niveau du mât météorologique de référence n'est pas un bon indicateur de prédiction du cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne pour les valeurs supérieures à 0,25. Les corrections utilisant la méthode de la matrice de la direction du vent et du cisaillement du vent peuvent ne pas être fiables. Il a été démontré que le cisaillement du vent a une influence significative et qu'il n'est pas correctement corrélé entre les deux emplacements; par conséquent, un filtrage supplémentaire est nécessaire pour tenter d'améliorer la corrélation.

Etape 2B: Tentative de suppression des données de cisaillement du vent non corrélées

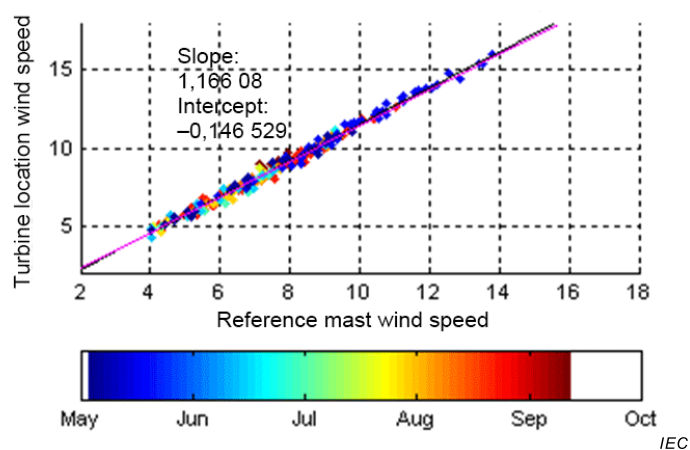
Les valeurs faibles de cisaillement du vent semblent être corrélées entre les deux emplacements. Les valeurs faibles de cisaillement du vent se produisent au cours de la journée (périodes d'instabilité atmosphérique). Par conséquent, à partir des tracés, un filtre de l'heure du jour est appliqué pour choisir toutes les données de la journée relevées entre 7 h et 19 h.

Les tracés conformes à C.5.2 sont présentés pour le nouvel ensemble de données filtrées (voir Figure C.13, Figure C.14 et Figure C.15).



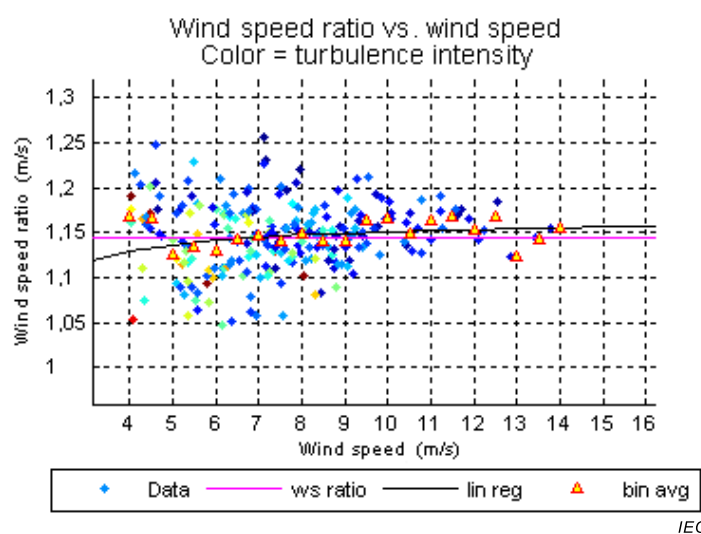
Anglais	Français
Reference mast vs turbine location shear exponent	Exposant de cisaillement au niveau du mât de référence par rapport à l'exposant de cisaillement à l'emplacement de l'éolienne
Turbine location shear exponent	Exposant de cisaillement à l'emplacement de l'éolienne
Reference mast shear exponent	Exposant de cisaillement au niveau du mât de référence

Figure C.13 – Exposants de cisaillement du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport au post-filtrage du mât météorologique de référence



Anglais	Français
Slope: 1,166 08	Pente: 1,166 08
Intercept: -0,146 529	Ordonnée à l'origine: -0,146 529
Turbine location wind speed	Vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne
Reference mast wind speed	Vitesse du vent au niveau du mât de référence
May	Mai
Jun	Juin
Jul	Juillet
Aug	Août
Sep	Septembre
Oct	Octobre

Figure C.14 – Régression linéaire de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu du mât météorologique de référence pour la tranche à 330°, post-filtrage



Anglais	Français
Wind speed ratio vs. wind speed Color = Turbulence intensity	Rapport de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent Couleur = Intensité des turbulences
Wind speed ratio (m/s)	Rapport de vitesses du vent (m/s)
Wind speed (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
Data	Données
Ws ratio	Rapport de vitesses du vent
Lin reg	Régression linéaire
Bin avg	Moyenne de la tranche

Figure C.15 – Rapports de vitesses du vent en fonction de la vitesse du vent pour la tranche à 330°, post-filtrage

Etape 3: Calculer les résultats

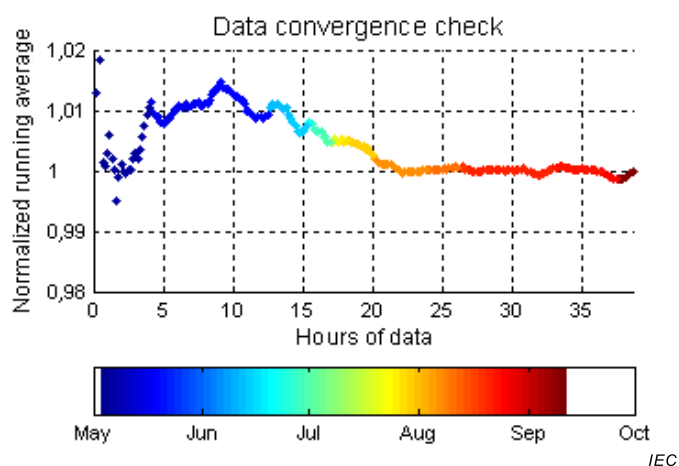
Lors de l'étape précédente, toutes les données relevées en conditions de stabilité atmosphérique élevée ont été supprimées, et seules les données de l'heure du jour relevées en conditions d'instabilité atmosphérique ont été conservées. Les valeurs de cisaillement du vent incluent une plage réduite d'exposants de cisaillement du vent (0,10 à 0,20). Ainsi, les corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site ne dépendent plus du cisaillement du vent et la méthode de régression linéaire peut être utilisée en remplacement de la matrice de tranches de la direction du vent et du cisaillement du vent.

Pour chaque tranche de direction du vent, une régression linéaire de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent au mât météorologique de référence est calculée, ainsi que la valeur r^2 de la régression. Le nombre total de points de données valides dans chaque tranche de direction du vent est également enregistré.

Etape 4: Incertitudes supplémentaires

Incertitude opérationnelle de l'anémomètre:

Aucune mesure de la vitesse verticale du vent n'a été incluse, de sorte que l'incertitude liée aux caractéristiques d'exploitation de classe B doit être utilisée. La classification des caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre est 5,4B.

Contrôle de la convergence (voir Figure C.16):

Anglais	Français
Data convergence check	Contrôle de la convergence des données
Normalized running average	Moyenne d'exploitation normalisée
Hours of data	Heures de données
May	Mai
Jun	Juin
Jul	Juillet
Aug	Août
Sep	Septembre
Oct	Octobre

Figure C.16 – Contrôle de la convergence des données pour la tranche à 330°**Contrôle de corrélation pour la régression linéaire**

Conformément à C.7.2 (voir Tableau C.3).

Tableau C.3 – Valeurs r^2 pour chaque tranche de direction du vent

Centre de la tranche	Valeur r^2	Valeur absolue de la moyenne résiduelle (en m/s)	Ecart-type résiduel (en m/s)
320	0,978	0,00	0,33
330	0,988	0,00	0,26
340	0,979	0,00	0,26
350	0,981	0,00	0,23

Variation de correction entre les tranches:

Conformément à C.7.3 (voir Tableau C.4).

Tableau C.4 – Incertitude supplémentaire due à des variations dans les tranches

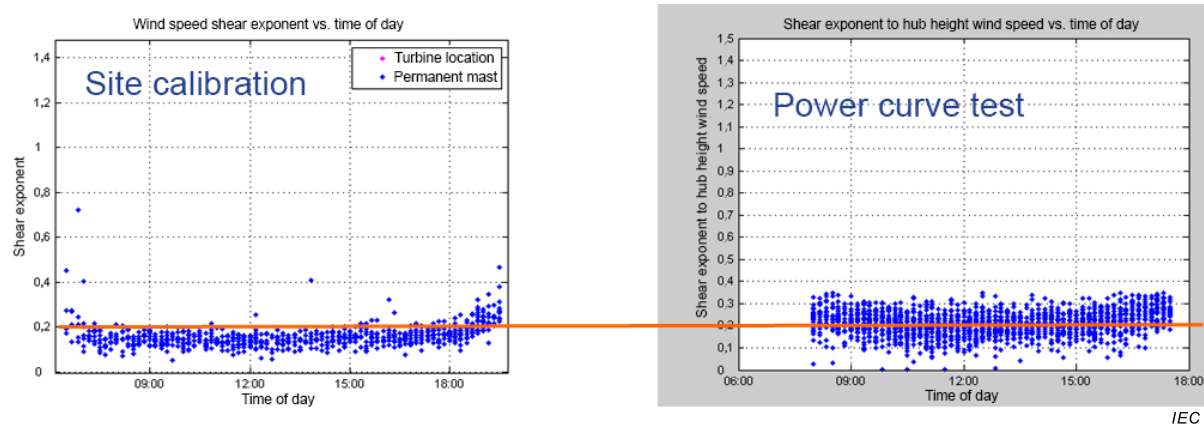
Centre de la tranche	Amplitude de variation entre les tranches (à gauche)	Amplitude de variation entre les tranches (à droite)	Incertitude-type supplémentaire (%)
320	1,019	-	0 % (dans les limites)
330	1,009	0,981	0 % (dans les limites)
340	1,013	0,988	0 % (dans les limites)
350	-	0,992	0 % (dans les limites)

Ajustement de la girouette:

La girouette n'a pas été déplacée, donc aucune incertitude supplémentaire n'est exigée, conformément à C.7.4.

Incertitude saisonnière:

L'étalonnage du site a été réalisé en hiver alors que la mesure de la courbe de puissance a été effectuée au cours de plusieurs saisons, dont l'été. Il est à noter qu'il a été nécessaire d'ajuster le filtre de l'heure du jour en raison des variations des heures de lever et de coucher du soleil. Une comparaison des valeurs des exposants de cisaillement du vent (voir Figure C.17) a révélé une variation de plus de 0,05 (0,15 par rapport à 0,22), c'est-à-dire supérieure aux limites données en C.7.5. Par conséquent, une incertitude supplémentaire due à la réalisation des mesures au cours de différentes saisons est exigée, conformément à C.7.5.



Anglais	Français
Wind speed shear exponent vs. time of day	Exposant de cisaillement de la vitesse du vent en fonction de l'heure du jour
Site calibration	Etalonnage du site
Turbine location	Emplacement de l'éolienne
Permanent mast	Mât permanent
Shear exponent	Exposant de cisaillement
Time of day	Heure du jour
Shear exponent to hub height wind speed vs. time of day	Exposant de cisaillement de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu en fonction de l'heure du jour
Power curve test	Essai de courbe de puissance
Shear exponent to hub height wind speed	Exposant de cisaillement de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu
Time of day	Heure du jour

Figure C.17 – Cisaillement du vent lors de l'étalonnage du site par rapport au cisaillement du vent lors de l'essai de courbe de puissance

La composante de correction saisonnière correspond à un tiers de l'amplitude de la correction totale. Elle peut être calculée pour chaque point de données de la manière suivante:

$$U = 1/3 \times \text{abs}(V_{\text{Turb\_predicted}} - V_{\text{RM\_measured}}) \quad (\text{C.9})$$

où

U est l'incertitude-type pour un point de données;

$V_{\text{Turb\_predicted-}i}$ est la vitesse du vent prédite au niveau de l'éolienne compte tenu des corrections de l'écoulement dictées par l'étalonnage du site;

$V_{\text{RM\_measured-}i}$ est la vitesse du vent mesurée à partir du mât météorologique de référence utilisé pour prédire la vitesse du vent au niveau de l'éolienne.

Les incertitudes au cours de l'essai de performance de puissance peuvent alors être moyennées par tranche en fonction de la vitesse et de la direction du vent au niveau du mât météorologique de référence pour calculer l'incertitude totale.

C.9.3 Exemple C

Description du site:

Le site est un terrain très complexe. Il est situé au sommet d'une montagne au sein d'une chaîne de montagnes. Le site se trouve en bord de crête, perpendiculaire à la direction de principe du vent. Le terrain descend en pente raide des deux côtés de la crête. Le vent est principalement unidirectionnel, car presque tous les vents proviennent d'un secteur de 30°. Il y a une autre ligne de crête de 3 km directement face au vent, plus haute de quelques centaines de mètres que le bord de crête sur lequel se trouve le site. Par conséquent, le site est considéré comme un terrain de type C, car il peut être localisé dans une zone de recirculation à partir de la crête face au vent.

Montage d'étalonnage du site:

Le mât météorologique est situé à une distance correspondant à 2,5 diamètres de rotor de l'éolienne à l'essai sur la même crête et à une altitude très similaire (dans les 5 m). Le cisaillement du vent a été mesuré à l'aide d'anémomètres montés à une hauteur inférieure sur des mâts météorologiques. Aucune mesure de la vitesse verticale du vent n'a été incluse.

Étape 1: vérifier l'importance du cisaillement du vent sur le site:

Les valeurs d'exposants de cisaillement du vent sont faibles, voire parfois négatives. Toutes les valeurs d'exposants de cisaillement du vent sont comprises entre -0,05 et 0,20 et ne présentent aucune corrélation évidente avec l'heure du jour ou d'autres conditions mesurées. Les turbulences sont élevées. Ces conditions indiquent une atmosphère neutre à instable. Le cisaillement du vent n'est donc pas considéré comme un facteur significatif pour l'étalonnage du site, et la méthode de régression linéaire peut être utilisée.

Étape 2:

Ignorée car il a déjà été déterminé que le cisaillement du vent est faible. Ce site ne présente pas une atmosphère stable.

Étape 3: calculer les résultats

Pour chaque tranche de direction du vent, une régression linéaire de la vitesse du vent à l'emplacement de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent au mât météorologique de référence est calculée, ainsi que la valeur r^2 de la régression. Le nombre total de points de données valides dans chaque tranche de direction du vent est également enregistré. La

dispersion des données est très élevée, de même que l'amplitude de la variation de correction de l'écoulement entre les tranches.

Etape 4: contrôles de la qualité et incertitude

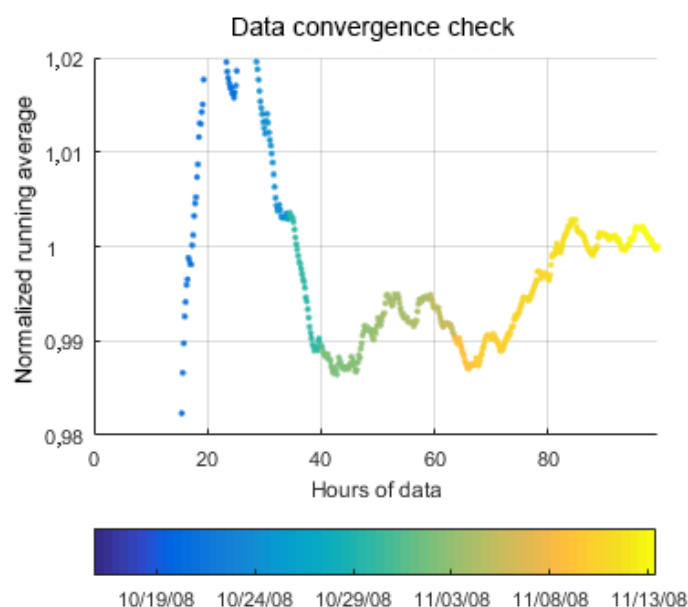
Les données confirment que le site se trouve dans une zone de recirculation de la crête face au vent. La dispersion des données est très élevée et les résultats ne convergent pas, ce qui indique qu'en dépit de l'installation côte à côte du mât météorologique de référence et de l'éolienne à l'essai sur la crête, à une altitude et sur un terrain local similaires, la corrélation des vitesses du vent entre les deux emplacements est très faible. Cette faible corrélation aura des conséquences négatives sur la précision et l'incertitude d'une mesure de la courbe de puissance pour l'emplacement en question.

Incertitude opérationnelle de l'anémomètre:

Aucune mesure de la vitesse verticale du vent n'a été incluse, de sorte que l'incertitude liée aux caractéristiques d'exploitation de classe B doit être utilisée. La classification des caractéristiques d'exploitation de l'anémomètre est 5,4B.

Contrôle de la convergence:

Le contrôle de la convergence des données pour toutes les tranches de direction du vent échoue. Les données ne convergent pas dans les 0,5 % de la valeur finale tant que 75 % des données recueillies n'ont pas été incluses. Un contrôle sur un échantillon pour l'une des tranches de direction du vent est représenté à la Figure C.18 ci-dessous.



IEC

Anglais	Français
Data convergence check	Contrôle de la convergence des données
Normalized running average	Moyenne d'exploitation normalisée
Hours of data	Heures de données

Figure C.18 – Contrôle de la convergence pour la tranche à 270°

Variation de l'amplitude de correction entre les tranches:

Toutes les tranches adjacentes ont subi des variations d'amplitude de l'ordre de 10 %. L'incertitude supplémentaire est calculée comme suit.

Tableau C.5 – Incertitude supplémentaire due à des variations dans les tranches

Centre de la tranche	Amplitude de variation entre les tranches (à gauche)	Amplitude de variation entre les tranches (à droite)	Incrtitude-type supplémentaire (%)
260	1,137	1,176	4,52 %
270	1,093	0,912	2,61 %
280	1,023	0,946	1,11 %

Ajustement de la girouette:

La girouette n'a pas été ajustée, donc aucune incertitude supplémentaire n'est exigée.

Ajustement de l'incrtitude saisonnière:

L'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance ont été réalisés au cours de différentes saisons (automne et été). Néanmoins, les variations des valeurs de cisaillement du vent et de turbulences n'ont pas dépassé les limites admissibles entre les saisons. Aucune vitesse verticale du vent n'a été enregistrée pour évaluer l'angle d'écoulement ascendant. Cependant, étant donné que le site se trouve dans une zone de recirculation, une large plage d'angles d'écoulement ascendant est prévue. Il n'y a aucune raison de prévoir une dépendance saisonnière. Le site se trouvait dans une zone à climat chaud avec une végétation minimale, donc aucune variation notable de la rugosité de la surface n'est prévue.

Aucune incrtitude supplémentaire pour les variations saisonnières n'est nécessaire.

Annexe D (normative)

Evaluation de l'incertitude de mesure

L'Annexe D traite des exigences de détermination de l'incertitude de mesure. Les fondements théoriques de la détermination de l'incertitude à l'aide de la méthode des tranches et un exemple élaboré d'estimation des incertitudes peuvent être consultés à l'Annexe E.

La courbe de puissance mesurée doit être complétée par une estimation de l'incertitude de la mesure. L'estimation doit être basée sur l'ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Incertainitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (GUM:1995).

Selon le Guide ISO/IEC Guide 98-3, il existe deux catégories d'incertitudes: les incertitudes de catégorie A dont l'amplitude peut être déduite des mesures et les incertitudes de catégorie B qui sont estimées par d'autres moyens. Dans les deux catégories, les incertitudes sont exprimées sous la forme d'écarts-types et sont appelées incertitudes-types.

a) Mesurandes

Les mesurandes sont la courbe de puissance déterminée par les valeurs de tranches mesurées et normalisées de la puissance électrique et de la vitesse du vent (voir 9.1 et 9.2) et la production annuelle d'énergie estimée (voir 9.3). Les incertitudes de mesure sont converties en incertitude sur le mesurande au moyen de facteurs de sensibilité.

b) Composantes d'incertitude

Le Tableau D.1 donne une liste minimale de paramètres d'incertitude qui doivent être inclus dans l'analyse d'incertitude.

Tableau D.1 – Liste des composantes d'incertitude

Paramètre mesuré	Composante d'incertitude	Catégorie d'incertitude
Puissance électrique	Transformateurs de courant	B
	Transformateurs de tension	B
	Transducteur de puissance ou dispositif de mesure de puissance	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
	Variabilité de la puissance électrique	A
Vitesse du vent (anémomètre à coupelles et à ultrasons)	Etalonnage de la soufflerie	B
	Classification	B
	Distorsion de l'écoulement au niveau du mât	B
	Distorsion de l'écoulement au niveau de la flèche	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
	Essai in situ	B
Vitesse du vent (dispositif de télédétection)	Essai de vérification du RSD	B
	Essai in situ	B
	Classification du RSD	B
	Effets du montage	B
	Variation de l'écoulement sur le volume de sonde à la même hauteur	B
	Essai de surveillance	B
Vitesse du vent équivalente du rotor	Mesure du cisaillement du vent	B
	Mesure de déviation de la trajectoire du vent	B

Paramètre mesuré	Composante d'incertitude	Catégorie d'incertitude
Direction du vent (girouette ou anémomètre à ultrasons)	Etalonnage	B
	Indicateur du nord	B
	Orientation de la flèche	B
	Caractéristiques opérationnelles (influence du mât)	B
	Angle de déclinaison magnétique	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
Direction du vent (dispositif de télédétection)	Essai de vérification	B
	Classification	B
	Essai de surveillance	B
	Variation de l'écoulement sur le volume de sonde à la même hauteur	B
	Alignement	B
	Angle de déclinaison magnétique	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
Température de l'air	Capteur de température	B
	Protection contre le rayonnement	B
	Effets du montage	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
Pression atmosphérique	Capteur de pression	B
	Effets du montage	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
Humidité relative	Capteur d'humidité	B
	Effets du montage	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
Système d'acquisition de données	Transmission du signal	B
	Précision du système	B
	Conditionnement du signal	B
Terrain (sans étalonnage du site)	Distorsion de l'écoulement due au terrain	B
Terrain (avec étalonnage du site)	Etalonnage de l'anémomètre avant l'essai	B
	Post-étalonnage/Etalonnage in situ	B
	Classification de l'anémomètre	B
	Effets du montage	B
	Montage normal	B
	Autre montage	B
	Montage latéral	B
	Paratonnerre	B
	Système d'acquisition de données (voir ci-dessous)	B
	Variation de correction (tranches adjacentes de direction du vent)	B
	Enlèvement du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance	B
	Variations saisonnières	B
	Variabilité statistique de l'étalonnage du site	A
Méthode	Correction de la masse volumique de l'air	B
	Conditions de vent – Informations de cisaillement manquantes	B
	Conditions de vent – Informations de déviation de la trajectoire manquantes	B

Paramètre mesuré	Composante d'incertitude	Catégorie d'incertitude
	Conditions de vent – Informations d'écoulement ascendant manquantes	B
	Conditions de vent – Informations de turbulences manquantes	B
	Variations saisonnières	B
	Normalisation des turbulences (ou absence de normalisation des turbulences)	B
	Mesures dans un climat froid	B

Il convient de noter que la méthode de la courbe de puissance de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu donnée dans la présente norme repose sur l'hypothèse implicite suivante: le rendement de puissance moyen d'une éolienne sur une période de 10 min s'explique entièrement par la vitesse du vent moyenne simultanée sur 10 min mesurée à la hauteur du moyeu et par la masse volumique de l'air.

Cela n'est pas le cas. D'autres variables d'écoulement affectent le rendement de puissance. Des éoliennes identiques donneront donc des rendements de puissance différents sur des sites différents même si la vitesse du vent à la hauteur du moyeu et la masse volumique de l'air sont identiques. Ces autres variables incluent les fluctuations de turbulences de la vitesse du vent (dans les trois directions), l'inclinaison du vecteur d'écoulement par rapport à l'horizontale, l'échelle des turbulences et le cisaillement de la vitesse du vent moyenne sur la surface du rotor. Les outils analytiques offrent actuellement une aide limitée pour identifier l'impact de certaines de ces variables, et les méthodes expérimentales rencontrent également de sérieuses difficultés.

Par conséquent, la courbe de puissance varie d'un site à l'autre, ce qui apparaîtra comme une incertitude.

Cette incertitude provient des différences de rendement de puissance observées dans différentes conditions topographiques et climatiques, c'est-à-dire en comparant une *AEP* mesurée en terrain homogène à une *AEP* mesurée sur le site d'un parc éolien non homogène.

Il est difficile de quantifier cette incertitude apparente. Selon les conditions du site et le climat, le pourcentage d'incertitude peut être très élevé. En termes généraux, une augmentation de l'incertitude peut être attendue lorsque la complexité de la topographie s'accroît et lorsque la fréquence des conditions atmosphériques non neutres augmente.

Cependant, cette version de la présente norme décrit des méthodes permettant de rendre compte d'au moins certaines de ces variables d'influence (par exemple, cisaillement du vent et turbulences). L'incertitude de ces méthodes de correction doit également être évaluée. Donc, implicitement, lorsque ces variables sont jugées significatives et lorsqu'aucune correction n'est réalisée, il convient d'augmenter l'incertitude afin de prendre en compte cette absence de correction.

Annexe E (informative)

Fondements théoriques de la détermination de l'incertitude de mesure à l'aide de la méthode des tranches

E.1 Généralités

Dans l'Annexe E, toutes les incertitudes énoncées dans l'ensemble de la norme ont été composées et additionnées afin de produire une évaluation cohérente de l'incertitude de mesure de la courbe de puissance, qui couvre à la fois la courbe de puissance et l'*AEP* calculée.

Pour simplifier la structure dans le but d'introduire ce sujet plutôt complexe, la présente annexe a été organisée de la manière indiquée ci-dessous. La structure principale comporte un article distinct pour chaque catégorie des composantes d'incertitude; comme la vitesse du vent comporte de nombreuses composantes d'incertitude, des articles dédiés leur sont consacrés (voir ci-dessous):

Article E.2	Description mathématique générale et tableau donnant une vue d'ensemble de toutes les composantes d'incertitude et de leurs amplitudes par défaut
Article E.3	Incertitudes de catégorie A
Article E.4	Incertitudes de catégorie B – Introduction et acquisition de données
Article E.5	Catégorie B – Puissance de sortie
Article E.6	Catégorie B – Vitesse du vent – Introduction et capteurs
Article E.7	Catégorie B – Vitesse du vent – RSD
Article E.8	Catégorie B – Vitesse du vent – REWS
Article E.9	Catégorie B – Vitesse du vent – Terrain
Article E.10	Catégorie B – Masse volumique de l'air
Article E.11	Catégorie B – Méthode
Article E.12	Catégorie B – Direction du vent
Article E.13	Composition des incertitudes

Cette annexe donne une méthode de calcul pour le regroupement des incertitudes, ainsi que des tableaux pertinents relatifs aux facteurs de corrélation et un exemple numérique (non exhaustif).

Pour toutes les incertitudes de catégorie B, la présente annexe présente l'objet de chaque composante d'incertitude, le symbole utilisé pour chaque composante, des références à d'autres annexes traitant de la composante ainsi qu'une discussion sur l'amplitude par défaut.

E.2 Composition des incertitudes

E.2.1 Généralités

Dans sa forme la plus générale, l'incertitude-type composée de la puissance dans la tranche i , $u_{c,i}$ peut être exprimée par:

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M c_{k,i} u_{k,i} c_{l,i} u_{l,i} \rho_{k,l,i} \quad (\text{E.1})$$

où

- $c_{k,i}$ est le facteur de sensibilité de la composante k dans la tranche i ;
- $u_{k,i}$ est l'incertitude-type de la composante k dans la tranche i ;
- M est le nombre de composantes d'incertitude dans chaque tranche;
- $\rho_{k,l,i,j}$ est le coefficient de corrélation entre la composante d'incertitude k dans la tranche i et la composante d'incertitude l dans la tranche j (dans l'expression, les composantes k et l se trouvent toutes les deux dans la tranche i).

La composante d'incertitude est la grandeur d'entrée individuelle correspondant à l'incertitude de chaque paramètre mesuré. L'incertitude-type composée sur la production annuelle d'énergie estimée, u_{AEP} , peut s'exprimer comme suit dans sa forme la plus générale:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M f_i c_{k,i} u_{k,i} f_j c_{l,j} u_{l,j} \rho_{k,l,i,j} \quad (\text{E.2})$$

où

- f_i est l'occurrence relative de la vitesse du vent dans la tranche i ;
- n est le nombre de tranches;
- N_h est le nombre d'heures dans une année $\approx 8\,760$.

Il est rarement possible de déduire toutes les valeurs des coefficients de corrélation $\rho_{k,l,i,j}$ de manière explicite; des simplifications significatives sont normalement nécessaires. Pour pouvoir simplifier à un niveau pratique les expressions ci-dessus des incertitudes composées, les hypothèses suivantes peuvent être retenues:

- a) les composantes d'incertitude sont soit entièrement corrélées ($\rho_{k,l,i,j} = 1$, ce qui implique une sommation linéaire pour obtenir l'incertitude-type composée), soit indépendantes ($\rho_{k,l,i,j} = 0$, ce qui implique une sommation quadratique, c'est-à-dire que l'incertitude-type composée est la racine carrée de la somme des carrés des composantes d'incertitude);
- b) les incertitudes de catégorie A ne sont pas corrélées avec les tranches de vitesse du vent, alors que les incertitudes de catégorie B sont entièrement corrélées avec les tranches de vitesse du vent.
- c) valable uniquement pour les incertitudes de l'étalonnage du site: les incertitudes de catégorie A ne sont pas corrélées avec les tranches de direction du vent, alors que les incertitudes de catégorie B sont entièrement corrélées avec les tranches de direction du vent.

La corrélation du même type d'incertitude à différentes hauteurs de mesure du vent lors du calcul de l'incertitude liée à la vitesse du vent équivalente du rotor ou une vitesse du vent normalisée en fonction du cisaillement/de la déviation de la trajectoire du vent doit être évaluée individuellement pour chaque composante et chaque cas. Chaque incertitude peut d'abord être cumulée sur les différentes hauteurs de mesure d'une certaine tranche de vitesse du vent équivalente du rotor ou de la vitesse du vent normalisée en fonction du cisaillement/de la déviation de la trajectoire du vent. Les composantes d'incertitude de la vitesse du vent équivalente du rotor ou de la vitesse du vent normalisée en fonction du cisaillement/de la déviation de la trajectoire du vent peuvent ensuite être traitées comme décrit aux points a) et b).

D'après ces hypothèses, l'incertitude composée de la puissance dans une tranche, $u_{c,i}$ peut être exprimée comme suit:

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + \sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2 = s_i^2 + u_i^2 \quad (\text{E.3})$$

où

M_A est le nombre de composantes d'incertitude de catégorie A;

M_B est le nombre de composantes d'incertitude de catégorie B;

$s_{k,i}$ est l'incertitude-type de catégorie A de la composante k dans la tranche i ;

s_i est l'incertitude composée de catégorie A dans la tranche i ;

u_i est l'incertitude composée de catégorie B dans la tranche i .

Il convient de noter que $u_{c,i}^2$ n'est pas indépendante de la taille de la tranche car $s_{P,i}$ dépend du nombre d'ensembles de données dans la tranche (voir Equation (E.10)).

Ces hypothèses impliquent que l'incertitude-type composée sur la production annuelle d'énergie, u_{AEP} , est:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B} \left(\sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i} \right)^2 \quad (E.4)$$

Le second terme de cette équation signifie que chaque composante d'incertitude individuelle de catégorie B progresse grâce à l'incertitude de l' AEP correspondante, en appliquant l'hypothèse d'une corrélation complète entre les tranches pour les composantes individuelles. Enfin, les composantes d'incertitude composée entre tranches sont additionnées de manière quadratique pour obtenir l'incertitude de l' AEP .

En outre, certaines composantes de l'incertitude de catégorie A ne peuvent pas toujours être déduites ou estimées aisément en se fondant sur les tranches. Par exemple, les composantes de catégorie A de la méthode d'étalonnage du site peuvent avoir été déduites d'une analyse de la sensibilité sur le calcul de l' AEP . Il convient dans ce cas d'ajouter ces composantes de manière quadratique dans l'incertitude sur l' AEP obtenue. Voir Equation (E.8) pour un exemple.

En pratique, il peut être malaisé d'ajouter les composantes d'incertitude de catégorie B dans toutes les tranches avant de les composer individuellement. Une approximation, qui permet de composer les composantes d'incertitude de catégorie B au sein des tranches avant de les composer entre des tranches différentes (s_i et u_i peuvent être utilisés), conduit à l'expression plus pratique suivante:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2} \right)^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2 \quad (E.5)$$

La valeur u_{AEP} obtenue par cette expression est toujours supérieure ou égale à celle obtenue à l'aide de l'Equation (E.4).

E.2.2 Incertitude élargie

Les incertitudes-types composées de la courbe de puissance et de l' AEP peuvent, de plus, être exprimées en termes d'incertitudes élargies. En se référant au Guide ISO/IEC 98-3 et en prenant l'hypothèse de distributions normales, des intervalles présentant les niveaux de confiance donnés dans le Tableau E.1 peuvent être obtenus en multipliant ces incertitudes-types composées par un facteur de couverture également donné dans le tableau.

Tableau E.1 – Incertitudes élargies

Niveau de confiance %	Facteur de couverture
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

E.2.3 Fondements de l'évaluation de l'incertitude

La méthodologie de calcul passe par une estimation des incertitudes de catégorie A et de catégorie B pour chaque tranche d'une courbe de puissance mesurée. L'incertitude sur la courbe de puissance est déduite, puis l'incertitude sur la production annuelle d'énergie (*AE_P*) est estimée. Etant donné les différences de calculs dans les différentes approches de mesure, il n'a pas été fourni d'exemple très élaboré. Lorsque cela est possible, un exemple élaboré pour une partie du calcul a été fourni afin de montrer comment ont été appliquées les équations et les estimations des valeurs par défaut pour les composantes d'incertitude.

La méthodologie de calcul s'appuie sur le Guide ISO, ainsi que sur les hypothèses ci-dessus. En utilisant la composition des composantes d'incertitude de catégorie B selon l'Equation (E.5), toutes les composantes d'incertitude de chaque tranche peuvent dans un premier temps être combinées afin d'exprimer l'incertitude composée de catégorie B de chaque paramètre mesuré, par exemple la vitesse du vent:

$$u_{V,i}^2 = u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + \dots \quad (\text{E.6})$$

où les composantes d'incertitude se réfèrent aux composantes d'incertitude du Tableau E., selon les mêmes symboles et indices que dans ce tableau.

Dans un deuxième temps, les incertitudes-types des mesurandes peuvent être exprimées par les incertitudes des paramètres de mesure dans la tranche *i*:

$$u_{C,i}^2 = s_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 s_{SC,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{M,i}^2 \quad (\text{E.7})$$

où

- $s_{P,i}$ est l'incertitude-type de catégorie A sur la puissance dans la tranche *i*;
- $s_{SC,i}$ est l'incertitude-type de catégorie A sur l'étalonnage du site dans la tranche *i*;
- $u_{P,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B sur la puissance dans la tranche *i*;
- $u_{V,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B sur la vitesse du vent dans la tranche *i*;
- $u_{T,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B sur la température dans la tranche *i*;
- $u_{B,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B sur la pression dans la tranche *i*;
- $u_{RH,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B sur l'humidité relative dans la tranche *i*;
- $u_{M,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B sur la méthode dans la tranche *i*;
- $c_{V,i}$ est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche *i*;
- $c_{T,i}$ est le facteur de sensibilité de la température dans la tranche *i*;
- $c_{B,i}$ est le facteur de sensibilité de la pression dans la tranche *i*;

$c_{RH,i}$ est le facteur de sensibilité de l'humidité relative dans la tranche i .

Cela donne également:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i^2 (s_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 s_{SC,i}^2) + \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{M,i}^2} \right)^2 \right) \quad (E.8)$$

Dans l'équation ci-dessus, les incertitudes dues au système d'acquisition de données font partie de l'incertitude pour chaque paramètre de mesure.

La courbe de puissance mesurée, représentée à la Figure 6 et au Tableau 4, est utilisée dans le calcul d'incertitude de la présente annexe. Les résultats de l'analyse d'incertitude de l'exemple sont également représentés à la Figure 6, au Tableau 4 et au Tableau 5. Tous les facteurs de sensibilité sont répertoriés au Tableau E.10; les incertitudes de catégorie B sont répertoriées au Tableau E.11.

Tableau E.2 – Liste des incertitudes de catégories A et B

Catégorie B: Instruments	Note	Incertaince	Sensibilité	Amplitude
Puissance de sortie		$u_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$	
Transformateurs de courant	a	$u_{P,CT,i}$		0,75 %
Transformateurs de tension	a	$u_{P,VT,i}$		0,5 %
Transducteur de puissance ou dispositif de mesure de puissance	a	$u_{P,PT,i}$		0,5 %
Acquisition de données (voir E.4.2)	d	$u_{dP,i}$		0,1 % à 0,2 %
Vitesse du vent		$u_{V,i}$		
Mesure de la vitesse du vent		$u_{VHW,i}$		
Vitesse du vent (anémomètre à coupelles ou à ultrasons)		$u_{VS,i}$		
Etalonnage	b	$u_{VS,precal,i}$	Pour l'incertitude sur l'AEP (et pour la dernière tranche de l'incertitude sur la courbe de puissance), utiliser:	D'après l'étalonnage
Post-étalonnage/Etalonnage in situ	b	$u_{VS,postcal,i}$		0,2 m/s
Classification	c	$u_{VS,class,i}$		1,0 %
Effets du montage			$c_{V,i} \approx \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}}$	
Montage unique en tête de mât	d	$u_{VS,mnt,i}$		0,5 %
Montage côte à côte	d	(identique)	Pour l'incertitude sur la courbe de puissance, utiliser:	1,0 %
Montage latéral	d	(identique)		1,5 %
Paratonnerre	d	$u_{VS,lgt,i}$	$c_{V,i} \approx \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(P_{i+1} - P_i)}{(V_{i+1} - V_i)} + \frac{(P_i - P_{i-1})}{(V_i - V_{i-1})} \right)$	0,1 % à 0,2 %
Acquisition de données (voir E.4.2)	d	$u_{dVS,i}$		0,1 % à 0,2 %
Vitesse du vent (RSD)		$u_{VR,i}$	$c_{V,i}$ (voir ci-dessus)	
Etalonnage	bc	$u_{VR,ver,i}$		2 % à 3 %
Contrôle in situ	c	$u_{VR,isc,i}$		Voir E.7.3
Classification	c	$u_{VR,class,i}$		1,0 % à 1,5 %
Montage	c	$u_{VR,mnt,i}$		0,1 %
Variation de l'écoulement sur différents volumes de sonde à la même hauteur	d	$u_{VR,flow,i}$		2 % à 3 %, voir E.7.6
Essai de surveillance	c	$u_{VR,mon,i}$		0,5 %

Catégorie B: Instruments	Note	Incertitude	Sensibilité	Amplitude
Vitesse du vent équivalente du rotor		$u_{REWS, i}$	$c_{V,i}$ (voir ci-dessus)	
Cisaillement du vent	c	$u_{REWS, shear, i}$		Voir E.8.2
Déviation de la trajectoire du vent	c	$u_{REWS, veer, i}$		Voir E.8.3
Vitesse du vent – Effets du terrain		$u_{VT,i}$	$c_{V,i}$ (voir ci-dessus)	
Sans étalonnage du site				
Distorsion de l'écoulement due au terrain	d	$u_{VT,i}$	$c_{V,i}$ (voir ci-dessus)	2 % ou 3 % (en mer 1 % ou 2 %)
Avec l'étalonnage du site				
Etalonnage de l'anémomètre	b	$u_{VT, precal, i}$		D'après l'étalonnage
Post-étalonnage/Etalonnage in situ	b	$u_{VT, postcal, i}$		0,2 m/s
Classification de l'anémomètre	c	$u_{VT, class}$		1,0 %
Effets du montage				
Montage unique en tête de mât	d	$u_{VT, mnt, i}$		0,5 %
Montage côte à côte	d	(identique)		1,0 %
Montage latéral	d	(identique)		1,5 %
Paratonnerre	d	$u_{VT, lgt, i}$		0,1 % à 0,2 %
Acquisition de données (voir E.4.2)	d	$u_{dVT, i}$		0,1 % à 0,2 %
Variation de correction (tranches adjacentes de direction du vent)	c	$u_{VT, coc, i}$		Voir E.9.8
Enlèvement du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance	c	$u_{VT, rmv, i}$		Voir E.9.9
Variations saisonnières	c	$u_{VT, sv, i}$		Voir E.9.10
Masse volumique de l'air		$u_{AD, i}$		
<u>Température</u>		$u_{T, i}$	$c_{T,i}$ (voir E.10.2)	
Capteur de température	ab	$u_{T, cal, i}$		0,4 K à 0,6 K
Protection contre le rayonnement	cd	$u_{T, shield, i}$		1,5 K à 2,5 K
Effets du montage	cd	$u_{T, mnt, i}$		0,25 K à 0,4 K
Acquisition de données (voir E.4.2)	c	$u_{dT, i}$		0,1 % à 0,2 %
<u>Pression atmosphérique</u>		$u_{B, i}$	$c_{B,i}$ (voir E.10.7)	
Capteur de pression	ab	$u_{B, cal, i}$		2 hPa à 4 hPa
Effets du montage	a	$u_{B, mnt, i}$		10 % de correction
Acquisition de données (voir E.4.2)	c	$u_{dB, i}$		0,1 % à 0,2 %
<u>Humidité relative</u>		$u_{RH, i}$	$c_{RH,i}$ (voir E.10.11)	
Capteur d'humidité	ab	$u_{RH, cal, i}$		1 % à 2 % (HR)
Effets du montage	cd	$u_{RH, mnt, i}$		0,1 % à 0,2 %
Acquisition de données (voir E.4.2)	c	$u_{dRH, i}$		0,1 % à 0,2 %
<u>Méthode</u>	cd	$u_{AD, method, i}$	$c_{AD, method, I} = c_{V, i}$ (pour les éoliennes avec contrôle actif) $c_{AD, method, I} = c_{V, i} = I$ (pour les éoliennes à régulation par décrochage)	0,2 % à 0,3 % de la vitesse du vent
Normalisation de la masse volumique de l'air				

Catégorie B: Instruments	Note	Incertitude	Sensibilité	Amplitude
Méthode		$u_{M,i}$	$c_{V,i}$ (voir ci-dessus)	
Conditions de vent	d	$u_{M,wc,i}$		Voir E.11.2.1, point a) ou b).
Conditions de vent – cisaillement du vent	d	$u_{M,shear,i}$		Voir E.11.2.2
Conditions de vent – déviation de la trajectoire du vent	d	$u_{M,veer,i}$		Voir E.11.2.3
Conditions de vent – écoulement ascendant	d	$u_{M,upflow,i}$		Voir E.11.2.4
Conditions de vent – turbulences	d	$u_{M,ti,i}$		0,3 % à 0,5 % (uniquement pour un RSD avec mât météorologique plus bas). Voir E.11.2.5
Variations saisonnières	d	$u_{M,sfx,i}$		0,7 %. Voir E.11.3
Normalisation des turbulences	d	$u_{M,tinorm,i}$		Voir E.11.4
Climat froid	d	$u_{M,cc,i}$		0,5 % à 1 %
Direction du vent				
Girouette de direction du vent		$u_{WV,i}$	Aucune (voir E.12.2.1)	
Etalonnage	b	$u_{WV,cal,i}$		Voir E.12.2.1
Indicateur du nord	c	$u_{WV,nm,i}$		Voir E.12.2.2
Orientation de la flèche	d	$u_{WV,bo,i}$		Voir E.12.2.3
Caractéristiques opérationnelles (influence du mât)	c	$u_{WV,oe,i}$		Voir E.12.2.4
Angle de déclinaison magnétique	c	$u_{WV,mda,i}$		Voir E.12.2.5
Acquisition de données (voir E.4.2)	c	$u_{dWV,i}$		Voir E.12.2.6
Direction du vent (RSD)		$u_{WR,i}$	Aucune (voir E.12.3)	
Vérification	ab	$u_{WR,ver,i}$		Voir E.12.3.1
Classification	c	$u_{WR,class,i}$		Voir L.4.4
Essai de surveillance	c	$u_{WR,mon,i}$		Voir E.12.3.2
Variation de l'écoulement sur différents volumes de sonde à la même hauteur	c	$u_{WR,fv,i}$		Voir E.12.3.3
Alignement	d	$u_{WR,align,i}$		Voir E.12.3.4
Angle de déclinaison magnétique	c	$u_{WR,mda,i}$		Voir E.12.3.5
Acquisition de données (voir E.4.2)	c	$u_{dWR,i}$		Voir E.12.3.6
Catégorie A: Statistiques				
Puissance électrique	e	$s_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$	
Etalonnage du site	e	s_{sc}	$c_{V,i}$ (voir ci-dessus)	
NOTE Identification des incertitudes: a = référence à la norme; b = étalonnage; c = autre "méthode objective"; d = "estimation"; e = statistique.				

Il convient de tenir compte des plages des composantes d'incertitude données dans le Tableau E.2. Il convient d'utiliser les valeurs réelles des mesures spécifiques lorsqu'elles sont disponibles. Il convient de noter qu'il est recommandé de ne pas estimer les composantes d'incertitude à une valeur nulle, comme indiqué dans les lignes directrices du *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, sauf si les composantes d'incertitude spécifiques ne conviennent pas à la méthodologie d'essai spécifique appliquée (voir Article E.14).

Il est également important de noter que l'incertitude de direction du vent n'a aucune influence directe sur l'incertitude relative à la courbe de puissance ou à l'*AEP* (sauf si une normalisation de la déviation de la trajectoire du vent est appliquée). L'incertitude de direction du vent est toutefois incluse ici. Il est en effet important de comprendre avec quel niveau de précision est mis en œuvre le filtrage du secteur de mesure, mais aussi avec quel niveau de précision les facteurs d'étalonnage du site sont appliqués aux données des secteurs appropriés. Etant donné que l'incertitude de direction du vent doit être consignée, ce tableau donne les composantes d'incertitude minimales qui doivent être prises en compte pour l'incertitude de direction du vent. Aucune estimation de l'amplitude de ces composantes n'est donnée, mais il convient de les inclure dans une courbe de puissance consignée.

Il est à noter que certains rapports d'étalonnage donnent une incertitude pour un facteur de couverture de 2 au lieu de 1. Afin de composer correctement les incertitudes, il convient de les convertir à un facteur de couverture cohérent avec toutes les entrées d'incertitude (par défaut, utiliser un facteur de couverture de 1).

E.3 Incertitudes de catégorie A

E.3.1 Généralités

Les incertitudes de catégorie A relatives à la puissance électrique mesurée et normalisée, ainsi que celles dues aux variations climatiques et à l'étalonnage du site (s'il a été réalisé) doivent être prises en compte.

E.3.2 Incertitude de catégorie A sur la puissance électrique

L'écart-type de la distribution des données de puissance normalisées dans chaque tranche est calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2} \quad (\text{E.9})$$

où

$\sigma_{P,i}$ est l'écart-type des données de puissance normalisées dans la tranche i ;

N_i est le nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche i ;

P_i est la puissance de sortie normalisée et moyennée dans la tranche i ;

$P_{n,i,j}$ est la puissance de sortie normalisée de l'ensemble de données j dans la tranche i .

L'incertitude-type sur la puissance normalisée et moyennée dans la tranche est estimée à l'aide de l'équation suivante:

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}} \quad (\text{E.10})$$

où

$s_{P,i}$ est l'incertitude-type de catégorie A sur la puissance dans la tranche i ;

$\sigma_{P,i}$ est l'écart-type des données de puissance normalisées dans la tranche i ;

N_i est le nombre d'ensembles de données de 10 min dans la tranche i .

E.3.3 Incertitudes de catégorie A sur l'étalonnage du site

Les résidus entre la vitesse du vent corrigée après l'étalonnage du site et mesurée au niveau du mât météorologique représentant l'éolienne sont utilisés pour déterminer l'incertitude de catégorie A de l'étalonnage du site, s_{SC} . Pour la méthode de dérivation, se reporter à C.6.1.

E.4 Incertitudes de catégorie B: Introduction et système d'acquisition de données

E.4.1 Incertitudes de catégorie B: Introduction

Par hypothèse, les incertitudes de catégorie B se rapportent aux instruments, au système d'acquisition de données, au terrain qui entoure le site d'essai de performance de puissance, ainsi qu'à l'incertitude relative à la méthode appliquée. Si les incertitudes sont exprimées comme des limites d'incertitude ou qu'elles comportent des facteurs implicites de couverture non unitaires, l'incertitude-type doit être estimée ou les incertitudes doivent être converties convenablement en incertitudes-types.

Soit une incertitude exprimée sous la forme d'une limite d'incertitude $\pm U$. Si l'hypothèse d'une distribution de probabilité rectangulaire est retenue, l'incertitude-type est:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (\text{E.11})$$

Si l'hypothèse d'une distribution de probabilité triangulaire est retenue, l'incertitude-type est:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{6}} \quad (\text{E.12})$$

E.4.2 Incertitudes de catégorie B: Système d'acquisition de données

Les incertitudes relatives à l'acquisition de données ont été incluses dans le traitement des signaux spécifiques. L'incertitude de la puissance électrique inclut une composante concernant l'acquisition de données; il en va de même pour la vitesse du vent et les autres signaux mesurés.

La présente annexe prend l'hypothèse que le système d'acquisition de données dispose d'une incertitude-type $u_{d,i}$ égale à 0,1 % de la plage complète de chaque canal de mesure. Toutefois, lors de la consignation d'un essai de performance de puissance spécifique, l'incertitude relative à l'acquisition de données doit être estimée pour la configuration d'essai spécifique, y compris au minimum les contributions à l'incertitude relative à l'acquisition de données mentionnées en E.4.2.

Il peut exister des incertitudes dues à la transmission, au conditionnement des signaux, à la conversion analogique-numérique, ainsi qu'au traitement de données dans le système d'acquisition de données. Les incertitudes peuvent être différentes selon le canal de mesure. L'incertitude-type du système d'acquisition de données concernant la plage complète d'un canal de mesure donné, $u_{d,i}$, peut être exprimée comme suit:

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d,ST,i}^2 + u_{d,SA,i}^2 + u_{d,SC,i}^2} \quad (\text{E.13})$$

où

$u_{d,ST,i}$ est l'incertitude due à la transmission du signal dans la tranche i ;

$u_{d,SA,i}$ est l'incertitude due à la précision du système dans la tranche i ;

$u_{d,SC,i}$ est l'incertitude due au conditionnement des signaux dans la tranche i .

Bien que l'hypothèse d'une incertitude-type égale à 0,1 % de la plage complète du canal de mesure se révèle raisonnable dans la plupart des cas, des conditions et des matériels spécifiques peuvent faire augmenter considérablement cette valeur. Pour s'assurer que l'incertitude du système d'acquisition de données est effectivement négligeable par rapport à l'incertitude des capteurs (qu'il convient, selon les lignes directrices, d'interpréter comme un facteur 10 d'amplitude par rapport aux incertitudes-types), une évaluation de l'incertitude réelle du système d'acquisition de données utilisé doit être réalisée.

E.5 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie

E.5.1 Généralités

Les incertitudes de catégorie B relatives à la puissance de sortie sont fondées sur quatre composantes d'incertitude, présentées ci-après.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{P,i}$.

L'incertitude de la mesure de puissance comporte des contributions d'incertitude dues aux transformateurs de courant et de tension, ainsi qu'au transducteur de puissance (ou tout autre dispositif de mesure de puissance). Les incertitudes de ces sous-composantes sont normalement mentionnées dans leurs classifications.

Enfin, l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de puissance doit être ajoutée.

E.5.2 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Transformateurs de courant

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude due au transformateur de courant, déterminée par la classification du capteur.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{P,CT,i}$.

Dans la présente annexe, l'hypothèse retenue est que les transformateurs de courant et le transducteur de puissance sont tous de classe 0,5, qui constitue la classe acceptable minimale pour une mesure de la courbe de puissance selon les exigences de la présente norme.

Les transformateurs de courant sont de classe 0,5 (les charges nominales des transformateurs de courant sont ici prévues pour correspondre à la puissance nominale de 2 000 kW, et non à 125 % de la puissance nominale). Ils ont des limites d'incertitude égales à $\pm 0,5$ % du courant pour une charge de 100 % (voir l'IEC 61689-2). Cependant, pour des charges de 20 % et 5 %, les limites d'incertitude augmentent respectivement jusqu'à $\pm 0,75$ % et $\pm 1,5$ % du courant. Pour les mesures de performance de puissance sur des éoliennes, la production d'énergie la plus importante s'effectue à puissance réduite. Il est ainsi prévu que les limites d'incertitude de $\pm 0,75$ % du courant à une charge de 20 % soient une bonne moyenne.

L'hypothèse d'une distribution d'incertitude rectangulaire du transformateur de courant est retenue. Si les transformateurs de courant ne sont pas exploités dans leurs limites de charges opérationnelles sur la boucle secondaire, des incertitudes supplémentaires doivent être ajoutées.

L'hypothèse retenue est que les incertitudes des trois transformateurs de courant sont causées par des facteurs d'influence externes, par exemple la température de l'air, la fréquence du réseau électrique, etc. Il est donc pris pour hypothèse qu'elles sont entièrement corrélées (par exception à l'hypothèse générale) et sont additionnées de manière linéaire. Puisque chaque transformateur de courant contribue à 1/3 de la mesure de puissance, il en résulte que l'incertitude de tous les transformateurs de courant est proportionnelle à la puissance comme suit:

$$u_{P,CT,i} = \frac{0,75 \% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \frac{1}{3} = 0,43 \% \cdot P_i [\text{kW}] \quad (\text{E.14})$$

E.5.3 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Transformateurs de tension

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude due au transformateur de tension, déterminée par la classification du capteur.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{P,VT,i}$.

Dans la présente annexe, l'hypothèse retenue est que les transformateurs de tension et le transducteur de puissance sont tous de classe 0,5, qui constitue la classe acceptable minimale pour une mesure de la courbe de puissance selon les exigences de la présente norme.

Les transformateurs de tension de classe 0,5 ont des limites d'incertitude égales à $\pm 0,5 \%$ de la tension pour toutes les charges (voir l'IEC 61869-3). L'hypothèse d'une distribution d'incertitude rectangulaire est retenue.

Les transformateurs de tension ne sont pas utilisés pour toutes les mesures, et la valeur de ces composantes d'incertitude peut être définie à zéro lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Si les transformateurs de tension ne sont pas exploités dans leurs limites de charges opérationnelles sur la boucle secondaire, des incertitudes supplémentaires doivent être ajoutées.

La tension du réseau électrique est normalement relativement constante et indépendante de la puissance de l'éolienne. L'hypothèse retenue est que les incertitudes des trois transformateurs de tension sont, comme pour les transformateurs de courant, causées par des facteurs d'influence externes, par exemple la température de l'air, la fréquence du réseau électrique, etc. Il est donc pris pour hypothèse qu'elles sont entièrement corrélées (par exception à l'hypothèse générale) et sont additionnées de manière linéaire. Puisque chaque transformateur de tension contribue à 1/3 de la mesure de puissance, il en résulte que l'incertitude de tous les transformateurs de courant est proportionnelle à la puissance comme suit:

$$u_{P,VT,i} = \frac{0,5 \% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \frac{1}{3} = 0,29 \% \cdot P_i [\text{kW}] \quad (\text{E.15})$$

E.5.4 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Transducteur de puissance ou autre dispositif de mesure de puissance

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude due au transducteur de puissance (ou tout autre dispositif de mesure de puissance) déterminée par la classification du capteur.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{P,PT,i}$.

Le transducteur de puissance de classe 0,5 (voir l'IEC 60688) d'une puissance nominale de 2 500 kW (125 % de la puissance nominale, soit 2 000 kW, de l'éolienne) a une limite d'incertitude de 12,5 kW. L'hypothèse d'une distribution d'incertitude rectangulaire est retenue.

L'incertitude du transducteur de puissance est ainsi:

$$u_{P,PT,i} = \frac{12,5 \text{ kW}}{\sqrt{3}} = 7,2 \text{ kW} \quad (\text{E.16})$$

E.5.5 Incertitudes de catégorie B: Puissance de sortie – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de puissance.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dP,i}$.

Par hypothèse, la valeur par défaut de l'amplitude de cette composante est comprise entre 0,1 % et 0,2 % de la plage complète du système d'acquisition de données.

En prenant pour hypothèse que la plage de puissance électrique du canal de mesure d'une éolienne de 2 MW est égale à 3 000 kW et que l'incertitude du système d'acquisition de données est égale à 0,1 % de cette plage, l'incertitude obtenue est de 3 kW.

E.6 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Introduction et capteurs

E.6.1 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Introduction

L'incertitude de la vitesse du vent compte trois composantes, chacune comportant elle-même plusieurs sous-composantes. Ces trois composantes sont:

- a) l'incertitude relative à l'utilisation de matériel de détection (anémomètres à coupelles, à ultrasons et dispositifs de télédétection (RSD));
- b) l'incertitude relative à la distorsion de l'écoulement due au terrain;
- c) l'incertitude relative aux méthodes appliquées.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{V,i}$.

Ces composantes d'incertitude, ainsi que leurs sous-composantes, seront introduites dans les paragraphes qui suivent.

Le facteur de sensibilité, $c_{V,i}$, est défini au Tableau E.2.

E.6.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Matériel

L'incertitude de la vitesse du vent relative au matériel compte trois composantes, chacune comportant elle-même plusieurs sous-composantes. Ces trois composantes sont:

- a) l'incertitude relative à l'utilisation de capteurs placés sur un mât météorologique (anémomètres à coupelles et à ultrasons);
- b) l'incertitude relative au dispositif de télédétection (RSD);
- c) l'incertitude relative à la vitesse du vent équivalente du rotor (REWS).

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VHW,I}$.

E.6.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique

E.6.3.1 Généralités

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'utilisation d'anémomètres à coupelles et à ultrasons sur les mâts météorologiques (montés en tête ou latéralement).

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VS,i}$ (où V représente la vitesse du vent et S représente les capteurs).

Cette composante d'incertitude compte six sous-composantes:

- a) l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur avant le début de l'essai de performance de puissance;
- b) l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur pendant ou après l'essai de performance de puissance;
- c) l'incertitude relative aux caractéristiques opérationnelles, déterminées par la classification du capteur;
- d) l'incertitude relative au montage du capteur;
- e) l'incertitude relative au montage du paratonnerre;
- f) l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur.

E.6.3.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique – Pré-étalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur avant l'essai. Cela inclut la variabilité des essais répétés pour une installation d'essai, ainsi que la variabilité des essais répétés entre différentes installations.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VS,precal,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe F de la présente norme.

Pour un essai de performance de puissance spécifique, les valeurs indiquées sur l'étalonnage des capteurs utilisés doivent être utilisées pour le calcul de l'incertitude.

E.6.3.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique – Post-étalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage in situ et/ou au post-étalonnage du capteur pendant et/ou après l'essai.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VS,postcal,i}$.

Cette incertitude est également décrite en 7.2.2 et à l'Annexe K de la présente norme.

Si un étalonnage in situ a été réalisé lors de l'essai de performance de puissance et si un post-étalonnage a été réalisé après l'essai de performance de puissance, l'amplitude de cette composante d'incertitude doit être issue du post-étalonnage.

Si un post-étalonnage est réalisé, l'amplitude de cette composante d'incertitude doit être égale à la différence maximale entre le pré-étalonnage et le post-étalonnage dans la plage de vitesses du vent comprise entre 4 m/s et 12 m/s, jusqu'à un maximum de 0,2 m/s.

Il est à noter que, étant donné l'incertitude inhérente de l'étalonnage, des différences mineures apparaîtront entre le pré-étalonnage et le post-étalonnage. La meilleure estimation

de la valeur d'étalonnage pour un capteur spécifique correspondra à la moyenne des étalonnages réalisés; dans la limite d'un très grand nombre d'étalonnages, la moyenne convergera vers le centre de la distribution.

Comme seul le pré-étalonnage est utilisé pour déterminer la vitesse du vent au niveau du capteur, la différence maximale peut donc être utilisée comme une contribution d'incertitude supplémentaire.

Si seul un étalonnage in situ est réalisé conformément à l'Annexe K, l'amplitude de cette composante d'incertitude doit être égale à la valeur maximale de δ dans la plage de vitesses du vent comprise entre 4 m/s et 12 m/s, jusqu'à un maximum de 0,2 m/s.

E.6.3.4 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique – Classification

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative aux caractéristiques opérationnelles du capteur, déterminées par la classification du capteur.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VS,class,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe I de la présente norme.

L'amplitude de cette incertitude doit être issue du rapport de classification. Le type de terrain sur lequel est utilisé le capteur doit correspondre au type de terrain adapté à la classification du capteur (classe A, B ou S).

Le rapport de performance de puissance doit faire référence au rapport de classification.

La plage mesurée des paramètres d'influence utilisés pour la classification, conformément à l'Annexe I, doit être consignée pour l'ensemble de données utilisé aux fins du rapport de performance de puissance. Si l'écoulement ascendant n'est pas mesuré, la conformité à la classe de précision doit être justifiée à partir des pentes du terrain local pour les directions du vent rencontrées, en adaptant un plan au terrain à une distance inférieure à 5 fois la mesure de hauteur relative à la position du WME conformément à l'IEC 61400-1:2005, 11.9.

L'incertitude opérationnelle de l'anémomètre de référence (dictée par un éventuel étalonnage du site) doit être incluse dans cette composante d'incertitude. Elle peut englober toutes les incertitudes de l'anémomètre de référence de l'étalonnage du site, certaines d'entre elles ou aucune d'entre elles, selon que la plage mesurée des paramètres d'influence rencontrés par le capteur de référence sur le mât météorologique permanent pendant l'étalonnage du site est ou non significativement différente de la plage des paramètres d'influence rencontrés par le capteur de référence sur le mât météorologique permanent pendant l'essai de courbe de puissance.

Par défaut, la moitié des incertitudes opérationnelles de l'anémomètre de référence et toutes les incertitudes opérationnelles de l'anémomètre monté sur l'éolienne pendant l'étalonnage du site, ainsi que la moitié des incertitudes opérationnelles de l'anémomètre pendant l'essai de courbe de puissance, doivent être incluses. Elles doivent être additionnées selon la méthode quadratique.

E.6.3.5 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique – Montage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative au montage du capteur.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VS,mnt,i}$.

Cette incertitude est également décrite en 7.2.4 et en 9.1.2, mais aussi à l'Annexe G de la présente norme.

Cette composante d'incertitude a trois valeurs par défaut qui correspondent aux trois configurations de montage admises par l'Annexe G (un seul anémomètre monté en tête de mât, anémomètres montés en tête de mât côte à côte ou anémomètre monté latéralement).

Pour un seul anémomètre monté en tête de mât, l'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est égale à 0,5 % de la vitesse du vent mesurée.

Pour des anémomètres montés côte à côte en tête de mât, l'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est égale à 1,0 %.

Pour un anémomètre monté latéralement, l'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est égale à l'une des valeurs suivantes:

- pour les signaux n'ayant pas subi de correction de l'écoulement, l'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à 1,5 % du signal mesuré;
- pour les signaux ayant subi une correction de l'écoulement conformément à 7.2.4 et à 9.1.2 (correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât), l'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est égale à la résultante quadratique de la moitié de la correction moyenne appliquée au signal de vitesse du vent et à 0,5 % du signal mesuré. Les effets du sillage doivent être exclus pour appliquer la correction.

Le même principe de correction peut également être appliqué à deux anémomètres montés en tête de mât dans une configuration en poteaux de but, avec la même amplitude par défaut pour le signal ayant subi une correction de l'écoulement.

E.6.3.6 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique – Paratonnerre

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à un éventuel paratonnerre monté en tête de mât et à son influence sur un anémomètre monté en tête de mât lorsque les exigences de l'Article G.5 pour le montage du paratonnerre ne peuvent pas être respectées.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VS,igt,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,1 % et 0,2 % du signal de vitesse du vent.

E.6.3.7 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs montés sur mât météorologique – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de vitesse du vent.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dVS,i}$.

Cette incertitude est également décrite en E.4.2 de la présente norme.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,1 % et 0,2 % de la plage complète du signal de vitesse du vent mesuré.

En prenant pour hypothèse que la plage de vitesses du vent est égale à 30 m/s du canal de mesure et que l'incertitude du système d'acquisition de données est égale à 0,1 % de cette plage, l'incertitude-type de l'acquisition de données est de 0,03 m/s.

E.7 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD

E.7.1 Généralités

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'utilisation de dispositifs de télédétection pour les mesures de vitesse du vent, comme les dispositifs de détection et télémétrie par ondes lumineuses (LIDAR, *Light Detection And Ranging*) et par ondes sonores (SODAR, *Sonic Detection And Ranging*).

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,i}$ (V représente la vitesse du vent et R représente le dispositif de télédétection).

Cette composante d'incertitude compte six sous-composantes:

- a) l'incertitude relative à la vérification du dispositif;
- b) l'incertitude relative au contrôle in situ du dispositif;
- c) l'incertitude relative aux caractéristiques opérationnelles du dispositif, déterminées par la classification du dispositif;
- d) l'incertitude relative au montage du dispositif;
- e) l'incertitude relative à la variation d'écoulement sur différents volumes de sonde à la même hauteur;
- f) l'incertitude relative à l'essai de surveillance.
- g)

E.7.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Etalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du dispositif de télédétection.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,ver,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe L.

Avant de procéder à la mesure, un étalonnage selon l'Annexe L doit être effectué et ses incertitudes doivent être évaluées ($u_{VR,vrf,i}$) (pour plus d'informations, voir L.4.3). Si les incertitudes relatives à la hauteur de mesure exacte ne sont pas disponibles, il est recommandé d'interpoler les incertitudes. L'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est comprise entre 1,0 % et 3,0 % de la vitesse du vent mesurée.

E.7.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Contrôle in situ

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la vérification du dispositif de télédétection, appliquée uniquement aux RSD équipant un mât météorologique d'une hauteur inférieure à celle du moyeu.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,isc,i}$ ("isc" représente le contrôle in situ, "in-situ check").

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe L de la présente norme.

L'essai in situ doit être évalué conformément à la description de l'Annexe K, où le RSD est le principal matériel de mesure et l'anémomètre monté sur le mât de surveillance est l'anémomètre de commande disposant des mêmes limites d'incertitude.

E.7.4 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Classification

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la classification du dispositif de télédétection.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,class,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe L de la présente norme.

L'incertitude due aux caractéristiques opérationnelles est issue du rapport de classification du RSD, qui donne les pentes et les plages des variables environnementales. Il existe trois façons de calculer l'incertitude due à ces variables:

1. La variable environnementale est mesurée lors de la mesure:

(selon l'Equation (L.6) de l'Annexe L)

$$u_{VR,class,i} = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot |\bar{x}_{PC,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}| \right)^2} \quad (E.17)$$

où

v_i est la vitesse du vent mesurée à la hauteur i ;

M est le nombre de variables environnementales réputées avoir une influence significative sur la précision du dispositif de télédétection selon l'essai de classification;

m_j est la pente décrivant la sensibilité de la mesure de la vitesse du vent par le dispositif de télédétection sur la variable environnementale j obtenue par combinaison des résultats d'au moins 3 essais de classification;

$\bar{x}_{PC,j,i}$ est la valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de l'essai de courbe de puissance;

$\bar{x}_{ver,j,i}$ est la valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de l'essai de vérification de performance sur le dispositif de télédétection.

2. La variable environnementale N'EST PAS mesurée lors de la mesure:

$$u_{VR,class,i} = v_i \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot \frac{\max(|x_{min,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}|, |x_{max,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}|)}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (E.18)$$

où

v_i est la vitesse du vent mesurée à la hauteur i ;

M est le nombre de variables environnementales réputées avoir une influence significative sur la précision du dispositif de télédétection selon l'essai de classification;

m_j est la pente décrivant la sensibilité de la mesure de la vitesse du vent par le dispositif de télédétection sur la variable environnementale j obtenue par combinaison des résultats d'au moins 3 essais de classification;

$x_{min,j,i}$ est la limite inférieure de la plage attendue pour la variable environnementale non mesurée j dans la tranche de vitesse du vent i ;

- $x_{\max,j,i}$ est la limite supérieure de la plage attendue pour la variable environnementale non mesurée j dans la tranche de vitesse du vent i ;
- $\bar{x}_{\text{ver},j,i}$ est la valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de l'essai de vérification de performance sur le dispositif de télédétection.

3. Si une plage fixe est attendue:

$$u_{VR,\text{class},i} = v_i \frac{\text{accuracy class}}{\sqrt{3}} \quad (\text{E.19})$$

NOTE Cette équation n'est pas précise, car les variations de la variable environnementale sont déjà incluses dans les incertitudes de catégorie A de la courbe de puissance.

Conformément à L.4.4, $u_{VR,\text{class}}$ devient égal à zéro si l'essai de vérification inclut les mêmes données que l'essai de courbe de puissance.

Pour plus de détails, voir L.4.4 dans l'Annexe L.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 1,0 % et 1,5 % de la vitesse du vent mesurée.

E.7.5 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Montage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative au montage du dispositif de télédétection.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,\text{mnt},i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe L de la présente norme.

L'incertitude du dispositif de télédétection due à un nivellement non idéal du dispositif doit être estimée. L'incertitude dépend fortement du type d'instrument utilisé.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à 0,1 % de la vitesse du vent mesurée.

E.7.6 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Variation d'écoulement

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la variation de l'écoulement sur le volume de mesure du dispositif de télédétection.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,\text{flow},i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe L de la présente norme.

Il convient que l'utilisateur consulte le fabricant du dispositif de télédétection pour connaître la meilleure manière d'évaluer l'incertitude du dispositif spécifique sur le site d'essai.

La procédure suivante est recommandée pour une utilisation normale (conformément à Albers *et al.*, référence [12]²⁵):

²⁵ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

$$u_{VR,flow,i} = \frac{(\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)) \cdot v_i}{2 \cdot \tan(\phi)} \quad (E.20)$$

α_1 est l'angle d'écoulement ascendant vers le volume de la sonde;

α_2 est l'angle d'écoulement ascendant depuis le volume de la sonde;

ϕ est l'angle d'ouverture du RSD par rapport à la verticale.

Une première estimation des angles d'écoulement ascendant entrant et sortant du volume d'essai, de 1° et de -1° respectivement, peut être utilisée.

Cette première estimation par défaut donne une composante d'incertitude comprise entre 2 % et 3 % de la vitesse du vent mesurée (en fonction de l'angle d'ouverture du RSD) conformément à L.4.5. A défaut, la méthode référencée en E.6.3.4 et basée sur la pente du terrain peut être utilisée.

E.7.7 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – RSD – Essai de surveillance

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative au résultat de la surveillance du dispositif de télédétection.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VR,mon,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe L.

Trois scénarios sont possibles et doivent être traités comme suit:

1. Aucune incertitude supplémentaire n'a besoin d'être ajoutée si le critère suivant est respecté:

$$\sqrt{u_{VRvf,mh,i}^2 + u_{VRcls,mh,i}^2} > |v_{RSD,mh,i} - v_{MM,i}| \quad (E.21)$$

$u_{VRvf,mh,i}$ est l'incertitude de la vérification du RSD à la hauteur du mât de contrôle dans la tranche i ;

$u_{VRcls,mh,i}$ est l'incertitude due aux caractéristiques opérationnelles du RSD à la hauteur du mât de contrôle dans la tranche i ;

$v_{RSD,mh,i}$ est la vitesse du vent du RSD à la hauteur du mât de contrôle dans la tranche i ;

$v_{MM,i}$ est la vitesse du vent du mât de contrôle dans la tranche i .

2. Si l'Equation (E.21) n'est pas respectée et que la hauteur de mesure du RSD est égale à la hauteur du mât météorologique de contrôle, l'incertitude suivante doit être ajoutée:

$$u_{VRmon,i} = |v_{RSD,mh,i} - v_{MM,i}| - \sqrt{u_{VRvf,mh,i}^2 + u_{VRcls,mh,i}^2} \quad (E.22)$$

3. Si l'Equation (E.21) n'est pas respectée et si la hauteur de mesure du RSD est différente de la hauteur du mât météorologique de contrôle, $u_{VRmon,i}$ doit être calculé comme suit:

$$u_{added\_systematic,j,i} = u_{added\_systematic,1,i} \frac{u_{systematic,j,i}}{u_{systematic,1,i}} \quad (E.23)$$

où

$u_{\text{added\_systematic},j,i}$	est l'incertitude-type ajoutée de catégorie B à la hauteur de mesure j (non couverte par le mât météorologique);
$u_{\text{added\_systematic},1,i}$	est l'incertitude ajoutée de catégorie B à la hauteur de la tête du mât météorologique;
$u_{\text{systematic},j,i}$	sont les autres incertitudes cumulées de catégorie B du dispositif de télédétection à la hauteur j ;
$u_{\text{systematic},1,i}$	sont les autres incertitudes cumulées de catégorie B du dispositif de télédétection à la hauteur de la tête du mât météorologique.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à 0,5 % de la vitesse du vent mesurée.

E.8 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – REWS

E.8.1 Généralités

De nombreuses composantes d'incertitude ne se rapportent pas à la mesure de la vitesse du vent (du moins pas appliquée à une vitesse du vent à la hauteur du moyeu), mais à l'utilisation et à la définition de la vitesse du vent équivalente du rotor (REWS). Les composantes d'incertitude relatives à la REWS sont couvertes dans le présent paragraphe.

La vitesse du vent équivalente du rotor, selon l'Equation (5) en 9.1.3.2, inclut des mesures de la vitesse du vent à différentes hauteurs au-dessus du sol. Pour que les calculs d'incertitude de la vitesse du vent équivalente du rotor soient faisables, les Equations (E.3) et (E.4) sont nécessaires. Les Equations (E.3) et (E.4) sont des approximations des Equations (E.1) et (E.2) respectivement, lorsque les composantes d'incertitude de catégorie B sont indépendantes entre les différentes sources d'incertitude de catégorie B. Cette approximation est largement enfreinte si des incertitudes de mesure de vitesse du vent à différents niveaux de hauteur sont traitées comme des incertitudes de catégorie B distinctes, car les composantes d'incertitude des mesures de vitesse du vent à différents niveaux de hauteur sont bien corrélées. Les Equations (E.3) et (E.4) ne peuvent donc pas être appliquées directement.

Afin de résoudre ce problème, les Equations (E.3) et (E.4) doivent être appliquées avec les composantes de catégorie B correspondantes pour la vitesse du vent équivalente du rotor, qui peuvent être traitées de façon indépendante les unes des autres. Le Paragraphe E.8.2 fournit des conseils sur la façon dont cela peut être mis en œuvre.

E.8.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – REWS – Mesure de la vitesse du vent sur l'ensemble du rotor

E.8.2.1 Généralités

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude sur la REWS en fonction des multiples mesures de vitesse du vent sur lesquelles est fondée la REWS.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{\text{REWS, shear}, i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe P de la présente norme.

NOTE Cette incertitude sera utilisée à la place de $u_{V,i}$ selon E.13.3.

La dérivation et donc l'amplitude sont fortement dépendantes des différentes méthodes de mesure introduites en 7.2; ce point est particulièrement important pour cette composante d'incertitude. Une configuration comportant un mât météorologique à la hauteur du moyeu

seulement ne conduira pas à une mise en œuvre de la REWS. Les autres configurations de mesure sont étudiées dans les paragraphes ci-dessous.

Il est à noter que le même symbole est utilisé dans chaque paragraphe. En effet, ces configurations s'excluent mutuellement et, selon la configuration de mesure spécifique, un seul des paragraphes E.8.2.2 à E.8.2.4 s'applique.

E.8.2.2 Incertitude de cisaillement de la REWS – Mât météorologique significativement au-dessus de la hauteur du moyeu

Dans cette configuration, la REWS est fondée sur les signaux produits par des anémomètres à coupelles ou à ultrasons montés latéralement à plusieurs hauteurs de mesure sur un mât météorologique.

Dans ce cas, l'Equation (5) en 9.1.3.2 s'applique et les composantes d'incertitude de la REWS sont issues de l'Article E.6.

Les valeurs par défaut sont issues de la combinaison des valeurs par défaut à l'Article E.6.

La manière de combiner ces composantes dans une incertitude de la REWS est décrite en E.13.7.

E.8.2.3 Incertitude de cisaillement de la REWS – RSD + mât météorologique d'une hauteur inférieure à celle du moyeu

Dans cette configuration, la REWS est fondée sur les signaux produits par un RSD. Les données du mât météorologique ne sont utilisées que pour valider les données du RSD.

Dans ce cas, l'Equation (5) en 9.1.3.2 s'applique et les composantes d'incertitude de la REWS sont issues de l'Article E.7.

Les valeurs par défaut sont issues de la combinaison des valeurs par défaut à l'Article E.7.

La manière de combiner ces composantes dans une incertitude de la REWS est décrite en E.13.7.

E.8.2.4 Incertitude de cisaillement de la REWS – Mât météorologique à la hauteur du moyeu + RSD du cisaillement

Dans cette configuration, la REWS est fondée sur les données d'un anémomètre à coupelles ou à ultrasons monté sur un mât météorologique à la hauteur du moyeu, combinées aux données de cisaillement d'un RSD.

Dans ce cas, l'Equation (11) en 9.1.3.4 s'applique et les composantes d'incertitude de la REWS sont issues de l'Article E.6 et de l'Article E.7.

Il existe dans ce cas une division supplémentaire: les signaux du RSD sont considérés soit comme des mesures de la vitesse du vent absolue, soit comme des mesures de la vitesse du vent relative, car le traitement des deux est différent. Cela dépend du type de matériel utilisé, ou de l'essai de sensibilité et de vérification disponible.

Pour une vitesse du vent absolue, la manière de combiner ces composantes dans une incertitude de la REWS est décrite en E.13.8.

Pour une vitesse du vent relative, la manière de combiner ces composantes dans une incertitude de la REWS est décrite en E.13.9.

E.8.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – REWS – Déviation de la trajectoire du vent

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'influence de la déviation de la trajectoire sur la REWS.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{\text{REWS,veer},i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe Q de la présente norme.

La mesure de la déviation de la trajectoire est fondée sur les signaux produits par des girouettes ou des anémomètres à ultrasons montés latéralement à plusieurs hauteurs de mesure sur un mât météorologique ou sur les signaux produits par un RSD.

Les sous-composantes de cette composante d'incertitude sont donc issues de E.12.2 ou de E.12.3.

E.9 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain

E.9.1 Généralités

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la distorsion de l'écoulement de la vitesse du vent entre le point de mesure et l'éolienne due au terrain local.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,i}$ (V représente la vitesse du vent et T représente le terrain).

Cette incertitude est également décrite en 6.3.4 de la présente norme.

Lorsque l'essai de performance de puissance est réalisé sans étalonnage du site, l'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est déterminée par la distance entre le dispositif de mesure et l'éolienne à l'essai. Si cette distance est comprise entre 2 et 3 diamètres de rotor ($2D \leq \text{distance} \leq 3D$), l'amplitude par défaut est égale à 2 % de la vitesse du vent mesurée pour un terrain plat sur terre et à 1 % en mer. Si cette distance est comprise entre 3 et 4 diamètres de rotor ($3D < \text{distance} \leq 4D$), l'amplitude par défaut est égale à 3 % de la vitesse du vent mesurée pour un terrain plat sur terre et à 2 % en mer.

Lorsque l'essai de courbe de puissance est réalisé avec étalonnage du site, l'amplitude par défaut de cette composante d'incertitude est déterminée par la mesure de l'étalonnage du site.

Dans ce cas, la composante d'incertitude relative au terrain compte neuf sous-composantes:

- a) l'incertitude relative à l'étalonnage des anémomètres utilisés pour l'étalonnage du site;
- b) l'incertitude relative aux caractéristiques opérationnelles des anémomètres utilisés pour l'étalonnage du site;
- c) l'incertitude relative au montage des anémomètres utilisés pour l'étalonnage du site;
- d) l'incertitude relative à l'acquisition de données des signaux produits par les anémomètres utilisés pour l'étalonnage du site;
- e) l'incertitude relative au contrôle de convergence;
- f) l'incertitude relative au contrôle de corrélation;
- g) l'incertitude relative à la variation de la correction entre des tranches adjacentes;
- h) l'incertitude relative à l'enlèvement du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et la mesure de la courbe de puissance;
- i) l'incertitude relative à la variation saisonnière.

E.9.2 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Pré-étalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage des capteurs avant l'essai.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,precal,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Article C.6 de la présente norme.

Cette incertitude est quasiment la même que $u_{VS,precal,i}$ à la différence qu'elle est appliquée aux vitesses du vent mesurées sur deux mâts.

Si l'anémomètre de référence n'est pas le même pour l'étalonnage du site et l'essai de courbe de puissance, son incertitude d'étalonnage s'annule complètement. Seule l'incertitude d'étalonnage de l'anémomètre au niveau du mât de l'éolienne est alors pertinente. Si l'anémomètre de référence est le même pour l'étalonnage du site et l'essai de courbe de puissance d'un anémomètre étalonné dans la soufflerie utilisée pour la calibration du premier anémomètre, une grande partie de l'étalonnage des anémomètres de référence s'annule si la soufflerie produit des résultats fortement reproductibles. Si l'anémomètre de référence est le même pour l'étalonnage du site et l'essai de courbe de puissance d'un anémomètre étalonné dans une soufflerie différente de celle utilisée pour l'étalonnage du premier anémomètre, l'incertitude des deux étalonnages d'anémomètres est pertinente.

E.9.3 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Post-étalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage in situ et/ou au post-étalonnage du capteur pendant et/ou après l'étalonnage du site.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,postcal,i}$.

Cette incertitude est également décrite en 7.2.2 et à l'Annexe K de la présente norme.

Si un étalonnage in situ a été réalisé lors de l'essai de performance de puissance et si un post-étalonnage a été réalisé après l'essai de performance de puissance, l'amplitude de cette composante d'incertitude doit être issue du post-étalonnage.

Si un post-étalonnage est réalisé, l'amplitude de cette composante d'incertitude doit être égale à la différence maximale entre le pré-étalonnage et le post-étalonnage dans la plage de vitesses du vent comprise entre 4 m/s et 12 m/s, jusqu'à un maximum de 0,2 m/s.

Il est à noter que, étant donné l'incertitude inhérente de l'étalonnage, des différences mineures apparaîtront entre le pré-étalonnage et le post-étalonnage. La meilleure estimation de la valeur d'étalonnage pour un capteur spécifique correspondra à la moyenne des étalonnages réalisés; dans la limite d'un très grand nombre d'étalonnages, la moyenne convergera vers le centre de la distribution.

Comme seul le pré-étalonnage est utilisé pour déterminer la vitesse du vent au niveau du capteur, la différence maximale peut donc être utilisée comme une contribution d'incertitude supplémentaire.

Si seul un étalonnage in situ est réalisé conformément à l'Annexe K, l'amplitude de cette composante d'incertitude doit être égale à la valeur maximale de δ dans la plage de vitesses du vent comprise entre 4 m/s et 12 m/s, jusqu'à un maximum de 0,2 m/s.

E.9.4 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Classification

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la classification des capteurs pour l'étalonnage du site.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,class,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Article C.6 de la présente norme.

Cette incertitude est quasiment la même que $u_{VS,class,i}$, à la différence qu'elle est appliquée à une mesure des vitesses du vent sur deux mâts. Certains des facteurs d'influence pour la classification auront la même influence sur les deux capteurs, ce qui provoquera une corrélation dans la réponse opérationnelle et une diminution de la différence entre les signaux. Les principaux facteurs d'influence, par exemple les turbulences, le cisaillement et l'écoulement ascendant, peuvent toutefois différer entre les deux emplacements de mesure; l'amplitude de cette composante d'incertitude doit donc être égale à l'incertitude relative à la classification d'un capteur.

L'amplitude de cette incertitude doit être issue du rapport de classification. Le type de terrain sur lequel est utilisé le capteur doit correspondre au type de terrain adapté à la classification du capteur (classe A, B ou S).

Le rapport d'étalonnage du site doit faire référence au rapport de classification. En l'absence d'une telle référence, l'amplitude par défaut de l'incertitude doit être de classe 3,4A (pour un terrain non complexe) ou de classe 4,5B (pour un terrain complexe).

La plage mesurée des paramètres d'influence utilisés pour la classification, conformément à l'Annexe I, doit être consignée pour l'ensemble de données utilisé pour le rapport d'étalonnage du site. Si l'écoulement ascendant n'est pas mesuré, la conformité à la classe de précision doit être justifiée à partir des pentes du terrain local pour les directions du vent rencontrées, en prenant pour hypothèse que l'angle vertical du vent est égal aux 2/3 de la pente moyenne du terrain à moins de 5D du côté exposé au vent de l'éolienne.

Si la plage mesurée des paramètres d'influence rencontrés par le capteur de référence sur le mât météorologique permanent pendant l'étalonnage du site est significativement différente de la plage des paramètres d'influence rencontrés par le capteur de référence sur le mât météorologique permanent pendant l'essai de courbe de puissance, il peut être nécessaire d'ajouter une incertitude supplémentaire. Tant que les deux essais restent dans les limites définies pour les classes A et B, la couverture est toutefois considérée comme suffisante et il n'est pas nécessaire de prendre en compte une incertitude supplémentaire.

E.9.5 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Montage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative au montage des capteurs pendant l'étalonnage du site.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,mnt,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Article C.6 de la présente norme.

Cette incertitude est quasiment la même que $u_{VS,mnt,i}$, à la différence qu'elle est appliquée à une mesure des vitesses du vent sur deux mâts. Lorsque les types des capteurs, les implantations des mâts et les directions du vent sont les mêmes, l'hypothèse d'une corrélation élevée entre les influences de montage des deux mâts sur les deux capteurs pourrait être envisagée, ce qui pourrait justifier une incertitude réduite. Cependant, même lorsque les types des capteurs et les implantations des mâts sont identiques, les directions du vent rencontrées en même temps par les deux mâts ne sont pas toujours identiques. Alors que l'influence du mât sur les capteurs est sensible à la direction, la corrélation réelle des effets du montage entre les deux mâts sera limitée et les effets du montage doivent être pris en compte.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude correspond à:

- a) 0,5 % de la vitesse du vent mesurée pour un seul anémomètre monté en tête de mât;

- b) 1,0 % pour une configuration avec des anémomètres montés côte à côte en tête de mât.
- c) Pour un anémomètre monté latéralement, l'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à l'une des valeurs suivantes:
 - 1) pour les signaux n'ayant pas subi de correction de l'écoulement, l'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à 1,5 % du signal mesuré;
 - 2) pour les signaux ayant subi une correction de l'écoulement conformément à 7.2.4 et à 9.1.2, l'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à la résultante quadratique de la moitié de la correction moyenne appliquée au signal de vitesse du vent et à 0,5 % du signal mesuré. Les effets du sillage doivent être exclus pour appliquer la correction. Cela remplace l'incertitude relative à l'absence de correction de l'écoulement, et ne doit pas lui être ajouté.

Le même principe de correction peut également être appliqué à deux anémomètres montés en tête de mât dans une configuration en poteaux de but, avec la même amplitude par défaut pour le signal ayant subi une correction de l'écoulement.

E.9.6 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Capteurs – Paratonnerre

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à un éventuel paratonnerre monté en tête de mât et à son influence sur un anémomètre monté en tête de mât lorsque les exigences de l'Article G.5 pour le montage du paratonnerre ne peuvent pas être respectées.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,igt,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,1 % et 0,2 % du signal de vitesse du vent.

E.9.7 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données des signaux des capteurs de vitesse du vent pendant l'étalonnage du site.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dVT,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Article C.6 de la présente norme.

Cette incertitude est quasiment la même que $u_{dVS,i}$, à la différence qu'elle est appliquée à une mesure des vitesses du vent sur deux mâts. Par hypothèse, l'acquisition de données des deux signaux est indépendante. Cette incertitude doit donc être comptée deux fois.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,1 % et 0,2 % de la plage complète du canal de mesure de vitesse du vent.

E.9.8 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Variation de correction entre tranches adjacentes

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage des capteurs avant l'essai.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,coc,i}$ (COC représente la variation de correction, "correction change").

Voir C.7.3 pour plus d'informations sur l'évaluation de cette incertitude.

E.9.9 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Enlèvement du capteur de direction du vent

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'enlèvement du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,rmv,i}$.

Voir C.7.4 pour plus d'informations sur l'évaluation de cette incertitude.

E.9.10 Incertitudes de catégorie B: Vitesse du vent – Terrain – Variation saisonnière

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la variation saisonnière entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{VT,sv,i}$ (SV représente la variation saisonnière, "*seasonal variation*").

Cette incertitude est également décrite en C.7.5 de la présente norme.

Cette incertitude ne doit être appliquée que si au moins l'une de ces conditions pour une tranche de direction du vent diffère d'une valeur supérieure aux valeurs suivantes entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance:

- a) 0,05 pour l'exposant de cisaillement du vent;
- b) 3 % pour l'intensité des turbulences;
- c) si l'écoulement ascendant est mesuré, une limite de variation de $\pm 2^\circ$ est recommandée pour l'écoulement ascendant vertical.

Si au moins l'une de ces conditions est déclenchée, l'amplitude par défaut de cette incertitude correspond à 1/3 de l'amplitude de la correction de l'écoulement dictée par l'étalonnage du site.

E.10 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air

E.10.1 Généralités

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'influence de la masse volumique de l'air sur la courbe de puissance.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{AD,i}$.

La masse volumique de l'air est déduite à partir des mesures de la température de l'air, de l'humidité et de la pression atmosphérique.

L'incertitude de masse volumique de l'air contient quatre composantes:

- l'incertitude relative à l'utilisation d'un capteur de température et à l'acquisition de données;
- l'incertitude relative à l'utilisation d'un capteur de pression et à l'acquisition de données;
- l'incertitude relative à l'utilisation d'un capteur d'humidité relative (HR) et à l'acquisition de données ou à l'absence d'un tel capteur;
- l'incertitude due à la correction de la masse volumique de l'air.

Ces composantes d'incertitude, ainsi que les sous-composantes associées, seront introduites dans l'Article E.10.

E.10.2 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Introduction – Température

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la mesure de la température.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{T,i}$.

Cette incertitude compte quatre composantes:

- a) l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de température;
- b) l'incertitude relative à la protection contre le rayonnement du capteur de température;
- c) l'incertitude relative au montage du capteur de température;
- d) l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de température.

Les équations relatives au calcul des facteurs de sensibilité pour la température sont:

sensibilité de température d'une mesure sur une éolienne avec contrôle de la puissance active:

$$c_{T,i} = -\frac{c_{v,i}v_i}{3\rho_i} \left(\frac{\rho_i}{T_i} + \frac{\phi_i}{T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846T_i) \right) \quad (\text{E.24})$$

où

- $c_{T,i}$ est le facteur de sensibilité de la température dans la tranche i ;
- $c_{v,i}$ est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i ;
- v_i est la vitesse du vent moyenne dans la tranche i ;
- ρ_i est la masse volumique de l'air moyenne dans la tranche i ;
- T_i est la température moyenne dans la tranche i ;
- Φ_i est l'humidité relative moyenne (plage de 0 % à 100 %) dans la tranche i ;
- R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK];
- R_w est la constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5) [J/kgK].

Sensibilité de température d'une mesure sur une éolienne à régulation par décrochage:

$$c_{T,i} = \frac{P_i}{\rho_i} \left(\frac{\rho_i}{T_i} + \frac{\phi_i}{T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) 0,0000205 \cdot 0,0631846 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T_i) \right) \quad (\text{E.25})$$

où

- $c_{T,i}$ est le facteur de sensibilité de la température dans la tranche i ;
- P_i est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i ;
- ρ_i est la masse volumique de l'air moyenne dans la tranche i ;
- T_i est la température moyenne dans la tranche i ;
- Φ_i est l'humidité relative moyenne (plage de 0 % à 100 %) dans la tranche i ;
- R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK];
- R_w est la constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5) [J/kgK].

E.10.3 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Etalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de température.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{T,cal,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,4 °C et 0,6 °C.

E.10.4 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Protection contre le rayonnement

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la protection contre le rayonnement du capteur de température.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{T,shield,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 1,5 °C et 2,5 °C.

E.10.5 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Montage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative au montage du capteur de température.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{T,mnt,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,25 °C et 0,4 °C.

E.10.6 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Température – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de température.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dT,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,1 % et 0,2 % de la plage complète du canal de mesure. En prenant pour hypothèse une plage de température de 40 °C, la valeur obtenue est égale à 0,04 °C.

E.10.7 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Introduction

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la mesure de la pression.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{B,i}$.

Cette composante d'incertitude compte trois sous-composantes:

- a) l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de pression;
- b) l'incertitude relative au montage du capteur de pression;
- c) l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de pression.

Les équations relatives au calcul des facteurs de sensibilité pour la pression sont:

Sensibilité de pression d'une mesure sur une éolienne avec contrôle de la puissance active:

$$c_{B,i} = \frac{c_{V,i} v_i}{3 \rho_i T_i R_0} \quad (\text{E.26})$$

où

$c_{B,i}$ est le facteur de sensibilité de la température du vent dans la tranche i ;

$c_{V,i}$ est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i ;

v_i est la vitesse du vent moyenne dans la tranche i ;

ρ_i est la masse volumique de l'air moyenne dans la tranche i ;

T_i est la température moyenne dans la tranche i ;

R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK].

Sensibilité de pression d'une mesure sur une éolienne à régulation par décrochage:

$$c_{B,i} = -\frac{P_i}{\rho_i T_i R_0} \quad (\text{E.27})$$

où

$c_{B,i}$ est le facteur de sensibilité de la température du vent dans la tranche i ;

P_i est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i ;

ρ_i est la masse volumique de l'air moyenne dans la tranche i ;

T_i est la température moyenne dans la tranche i ;

R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK].

E.10.8 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Etalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de pression.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{B,\text{cal},i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 2 hPa et 4 hPa.

E.10.9 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Montage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative au montage du capteur de pression.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{B,\text{mnt},i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est déterminée par la différence de hauteur pour laquelle est corrigé le signal du capteur de pression. La pression relative à cette différence de hauteur peut être calculée selon l'ISO 2533. L'amplitude par défaut de l'incertitude relative à cette correction de pression est égale à 10 % de la correction.

Pour un capteur installé à une hauteur de 2 m et une hauteur du moyeu de 100 m, la différence est égale à 98 m, ce qui donne une différence de pression de 11,7 hPa. L'incertitude serait alors de 1,17 hPa.

E.10.10 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Pression – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de pression.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dB,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à 0,1 % de la plage complète du canal de mesure pour la pression. En prenant pour hypothèse une plage de pressions de 100 hPa du canal de mesure, la valeur obtenue est égale à 0,1 hPa.

E.10.11 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Introduction

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la mesure de l'humidité relative.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{RH,i}$.

La mesure de l'humidité relative n'est pas exigée. Dans ce cas, une valeur par défaut de 50 % avec une incertitude de 100 % (entre 0 % et 100 %) doit être prise pour hypothèse.

Lorsque l'humidité est mesurée, cette composante d'incertitude compte trois sous-composantes:

- a) l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur d'humidité;
- b) l'incertitude relative au montage du capteur d'humidité;
- c) l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur d'humidité.

Les équations relatives au calcul des facteurs de sensibilité pour l'humidité relative sont:

Sensibilité d'humidité relative d'une mesure sur une éolienne avec contrôle de la puissance active:

$$c_{RH,i} = -\frac{c_{v,i}v_i}{3\rho_i T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \cdot 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T_i) \quad (E.28)$$

où

$c_{RH,i}$ est le facteur de sensibilité de la température du vent dans la tranche i ;

$c_{v,i}$ est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i ;

v_i est la vitesse du vent moyenne dans la tranche i ;

ρ_i est la masse volumique de l'air moyenne dans la tranche i ;

T_i est la température moyenne dans la tranche i ;

R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK];

R_w est la constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5) [J/kgK].

Sensibilité d'humidité relative d'une mesure sur une éolienne à régulation par décrochage:

$$c_{RH,i} = \frac{P_i}{\rho_i T_i} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \cdot 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T_i) \quad (E.29)$$

où

$c_{RH,i}$ est le facteur de sensibilité de la température du vent dans la tranche i ;

- P_i est le facteur de sensibilité de la vitesse du vent dans la tranche i ;
 ρ_i est la masse volumique de l'air moyenne dans la tranche i ;
 T_i est la température moyenne dans la tranche i ;
 R_0 est la constante des gaz pour l'air sec (287,05) [J/kgK];
 R_w est la constante des gaz pour la vapeur d'eau (461,5) [J/kgK].

E.10.12 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Etalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur d'humidité.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{RH,cal,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 1 % et 2 %.

E.10.13 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Montage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur d'humidité.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{RH,mnt,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,1 % et 0,2 % de la valeur mesurée.

E.10.14 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Humidité relative – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur d'humidité.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dRH,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est égale à 0,1 % de la plage complète du canal de mesure pour l'humidité relative.

E.10.15 Incertitudes de catégorie B: Masse volumique de l'air – Correction

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la correction de la masse volumique de l'air.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{AD,method,i}$.

Dans le cadre de l'analyse des données, la masse volumique de l'air mesurée est normalisée à la masse volumique de l'air de référence. Cette normalisation est liée à une composante d'incertitude, en partie à cause des incertitudes relatives à la température, la pression et l'humidité relative mesurées, mais également parce que l'une des hypothèses sous-jacentes sur lesquelles se fonde la formule de normalisation est de plus en plus imprécise, ce qui augmente la différence de masse volumique de l'air à laquelle s'applique la normalisation de masse volumique de l'air.

Pour une éolienne à régulation par décrochage avec pas de pale constant et vitesse de rotation constante, cette incertitude doit être évaluée en procédant à un moyennage de tranche de la puissance de sortie normalisée à la masse volumique de l'air ainsi que de la puissance de sortie mesurée par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. La moitié

de l'écart entre la puissance de sortie normalisée et la puissance de sortie mesurée par tranche de vitesse du vent doit être considérée comme l'incertitude-type de la normalisation de la masse volumique de l'air dans cette tranche de vitesse du vent.

Pour une éolienne avec contrôle de la puissance active, l'incertitude de la normalisation de la masse volumique de l'air doit être évaluée en procédant à un moyennage par tranche de la vitesse du vent mesurée par rapport à la vitesse du vent normalisée pour la masse volumique de l'air. La moitié de l'écart entre la vitesse du vent normalisée et la vitesse du vent mesurée doit être considérée comme l'incertitude-type de la normalisation de la masse volumique de l'air dans cette tranche de vitesse du vent.

Dans cet exemple utilisant une éolienne avec contrôle de la puissance active, les écarts de vitesse du vent par tranche de vitesse du vent sont répertoriés au Tableau E.9.

E.11 Incertitudes de catégorie B: Méthode

E.11.1 Généralités

La méthode spécifique utilisée pour mesurer ou analyser une courbe de puissance peut également contribuer à l'incertitude du résultat. Autant que possible, cette incertitude a été ajoutée aux incertitudes de catégorie B auxquelles elle se rapporte. L'incertitude relative à la correction de la masse volumique est donc incluse dans la masse volumique de l'air, tandis que l'incertitude relative à la correction de la distorsion de l'écoulement est incluse dans les capteurs de vitesse du vent.

Certaines des incertitudes relatives à la méthode, regroupées sous l'en-tête "Méthode", ne peuvent toutefois pas être facilement attribuées à une composante spécifique.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M,i}$.

E.11.2 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Conditions de vent

E.11.2.1 Généralités

Bien que cette incertitude ne soit directement décrite nulle part ailleurs dans la présente norme, elle est intimement liée à la définition de la courbe de puissance décrite à l'Article 5 de la présente norme.

Conformément à la définition donnée, la courbe de puissance selon la présente norme est une courbe de puissance spécifique au climat. Les conditions de vent (cisaillement du vent, déviation de la trajectoire du vent, turbulences et écoulement ascendant) ont une influence directe sur la performance de puissance d'une éolienne.

Par exemple, soit une courbe de puissance mesurée pour l'ensemble spécifique de conditions de vent suivantes: cisaillement = 0,1, déviation de la trajectoire du vent = 10°, turbulences = 10 % et écoulement ascendant = +2°. La courbe de puissance mesurée serait alors consignée en même temps que ces valeurs, et il ne serait pas nécessaire d'introduire d'autres incertitudes.

Toutefois, les valeurs rencontrées pour ces paramètres lors d'une mesure de la courbe de puissance ne sont généralement pas constantes, et lors de la mesure de la courbe de puissance, chacun de ces paramètres reflétera une plage de valeurs auxquelles a été soumise l'éolienne. Dans cet exemple, soit un cisaillement compris entre 0 et 0,3, une déviation de la trajectoire du vent comprise entre 0° et 20°, un niveau de turbulences compris entre 3 % et 20 % et un écoulement ascendant compris entre 0° et 5°. Au fur et à mesure de la mesure, l'échantillonnage se fait donc parmi plusieurs courbes de puissance. Ces variables d'entrée étant incontrôlables, la prochaine mesure de la courbe de puissance sur le même site (que ce soit immédiatement après la première mesure ou un an plus tard pour réaliser la

mesure à la même saison) sera donc plus ou moins différente de la première. C'est le principal argument en faveur de l'ajout d'une composante d'incertitude relative aux conditions de vent.

Dans cette perspective, les éléments suivants sont à prendre en compte:

- a) Si un ou plusieurs des quatre paramètres qui déterminent les conditions de vent n'ont pas été mesurés, la courbe de puissance ne peut pas être consignée précisément. L'incertitude associée ne peut être estimée qu'en prenant pour hypothèse des plages et valeurs possibles pour les paramètres manquants, et en estimant leur influence potentielle sur la performance de puissance de l'éolienne.
- b) Des informations supplémentaires sont disponibles pour les paramètres qui ont été mesurés, mais elles ne sont pas forcément suffisantes pour caractériser la performance de puissance en détail. Par exemple:
 - Un paramètre mesuré en trois points de la surface du rotor peut ne pas donner une image complète des surfaces qui n'ont pas été mesurées.
 - Les conditions de vent (par exemple, le cisaillement) sont mesurées à une distance comprise entre deux et quatre diamètres de rotor de l'éolienne et, la plupart du temps, sans aucune autre donnée concernant le degré auquel les conditions à l'emplacement de mesure reflètent les conditions à l'emplacement de l'éolienne. Il est à noter que l'incertitude concernant la corrélation de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est examinée en E.9.1.
 - Un argument similaire s'applique à la dimension horizontale du rotor; la mesure ne caractérise en grande partie que la variation de hauteur de ces paramètres, mais pas la variabilité horizontale des paramètres mesurés.

A la lumière de ces arguments, une approche pratique a été adoptée. Pour au moins neuf hauteurs de mesure de l'un de ces paramètres, l'hypothèse selon laquelle aucune incertitude supplémentaire ne doit être ajoutée a été retenue. S'il y a moins de hauteurs de mesure, une augmentation supplémentaire de l'incertitude sera ajoutée.

Cela signifie que certains des points ci-dessus ne sont pas du tout envisagés dans l'analyse de l'incertitude actuelle; ils seront inclus dans une prochaine révision de la présente norme après éclaircissement d'un nombre suffisant de points.

- c) Si un ou plusieurs de ces paramètres ont été mesurés, il peut être possible de normaliser la courbe de puissance à l'aide de ces informations, comme indiqué à l'Annexe M, à l'Annexe P et à l'Annexe Q.

Les incertitudes relatives aux points a) et b) sont couvertes dans le présent paragraphe, alors que l'incertitude relative aux normalisations est couverte ci-après.

Un grand nombre de ces influences seront exprimées sous la forme d'une incertitude de la vitesse du vent. Les valeurs d'expérience sur lesquelles se fondent les estimations par défaut s'expriment souvent en termes d'*AEP*. Dans le cadre d'une approche pratique, il a été décidé de l'exprimer sous la forme d'une incertitude par l'intermédiaire de la vitesse du vent.

E.11.2.2 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Conditions de vent – Cisaillement

E.11.2.2.1 Généralités

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M, \text{shear}, i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude peut être trouvée dans les deux paragraphes ci-dessous.

E.11.2.2.2 Couverture de la mesure du cisaillement du vent pour la moitié du rotor

Cette estimation d'incertitude s'applique à une courbe de puissance pour laquelle la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est définie et sans normalisation conforme à l'Annexe P. Etant donné que les courbes de puissance d'une éolienne sont influencées par le cisaillement du

vent, l'incertitude de la courbe de puissance mesurée due au cisaillement du vent doit être estimée avec prudence et être prise en compte même si aucune mesure du cisaillement du vent n'est réalisée. Pour cette raison, un facteur de correction du cisaillement du vent conforme à l'Equation (9) et à l'Equation (10) en 9.1.3.3 doit être calculé en prenant les hypothèses suivantes:

- Soient 20 mesures virtuelles de la vitesse du vent également distribuées sur toute la plage de hauteurs du rotor, ce qui donne 20 facteurs de pondération.
- Soient une loi exponentielle pour la moitié inférieure du rotor et une autre loi exponentielle pour la moitié supérieure du rotor. En fonction de ces lois exponentielles, la vitesse du vent relative à la hauteur du moyeu doit être calculée pour chaque hauteur de mesure virtuelle. L'exposant de cisaillement du vent appliqué à la moitié inférieure du rotor doit être déterminé à partir des mesures pour chaque point de données sur 10 min. Il doit être pris pour hypothèse que l'exposant de cisaillement du vent pour la moitié supérieure du rotor est égal à la moitié de la valeur utilisée pour la moitié inférieure du rotor. Lorsque les valeurs de cisaillement sont négatives, la moitié de ces valeurs doivent être prises pour hypothèse pour la moitié supérieure du rotor.

Par hypothèse, l'incertitude-type de la courbe de puissance mesurée en termes de vitesse du vent due à l'absence de mesures du cisaillement du vent doit être calculée comme suit pour la tranche de vitesse du vent i :

$$u_{M, shear, i} = \frac{1}{\sqrt{3}} |f_r - 1| v_{h, i} \quad (\text{E.30})$$

où

f_r est le facteur de correction du cisaillement du vent calculé en 9.1.3.3;

$v_{h, i}$ est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu dans la tranche i .

Le Tableau E.3 donne des exemples d'incertitudes-types estimées pour les mesures de la courbe de puissance en termes de vitesse du vent, dues à l'absence de mesures du cisaillement du vent. L'incertitude correspondante augmente en même temps que le diamètre du rotor et diminue en même temps que la hauteur du moyeu.

Tableau E.3 – Exemples d'incertitudes-types dues à l'absence de mesures du cisaillement du vent

H	D	$u_{M, shear, i} / v_H$
[m]	[m]	[%]
60	60	3,0
60	80	3,9
100	80	2,4
120	80	2,0
100	120	3,5
150	120	2,4
Par hypothèse, des exposants de cisaillement du vent de 0,5 et 0 ont été retenus pour les moitiés inférieure et supérieure du rotor, respectivement.		

E.11.2.2.3 Couverture de la mesure du cisaillement du vent pour la totalité du rotor

Cette estimation d'incertitude s'applique à:

- une courbe de puissance appliquant la définition de la vitesse du vent équivalente du rotor (REWS);

- b) une courbe de puissance de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à laquelle s'applique la normalisation définie à l'Annexe P.

Le calcul de la REWS conformément à l'Equation (5) en 9.1.3.2, prend pour hypothèse une vitesse du vent constante pour chaque hauteur de mesure. Cette hypothèse conduit à une incertitude d'évaluation de la REWS. Cette incertitude doit être estimée en appliquant une loi exponentielle à chaque paire de mesures de vitesse du vent à des hauteurs de mesure successives (z_m). La vitesse du vent selon cette loi exponentielle doit être calculée pour au moins 10 niveaux de hauteur également distribués entre chaque paire de hauteurs de mesure. La sommation, conformément à l'Equation (5), doit être répétée avec tous les niveaux de hauteur couverts par l'hypothèse de loi exponentielle et les hauteurs de mesure. Il doit être pris pour hypothèse que l'écart en pourcentage entre la REWS qui en résulte et la REWS utilisant seulement les vitesses du vent mesurées correspond à l'incertitude-type (en pourcentage) de la vitesse du vent due au nombre limité de hauteurs de mesure.

L'estimation de l'incertitude-type due au nombre limité de hauteurs de mesure doit être effectuée sur la base des moyennes de tranche des mesures de vitesse du vent aux différents niveaux de hauteur en fonction de la vitesse du vent finalement appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance.

NOTE Des ensembles de données de 10 min sont nécessaires pour le calcul.

E.11.2.3 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Conditions de vent – Déviation de la trajectoire du vent

E.11.2.3.1 Généralités

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à moins de neuf hauteurs de mesure pour la déviation de la trajectoire du vent.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M,veer,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude peut être déterminée à l'aide des trois paragraphes ci-dessous.

E.11.2.3.2 Aucune mesure de la déviation de la trajectoire

Un facteur de correction de la déviation de la trajectoire du vent conforme à l'Equation (Q.1) doit être calculé en prenant les hypothèses suivantes:

- Soient des vitesses du vent égales à 1 à toutes les hauteurs de mesure. L'Equation (Q.1) se transforme alors en facteur de correction de la déviation de la trajectoire du vent.
- Soient 20 mesures virtuelles de la direction du vent également distribuées sur toute la plage de hauteurs du rotor, ce qui donne 20 facteurs de pondération.
- Soit une déviation de la trajectoire du vent homogène sur toute la plage de hauteurs du rotor aussi large qu'il peut être raisonnablement attendu pour le site d'essai. Si aucune hypothèse raisonnable ne peut être formulée concernant la déviation de la trajectoire du vent extrême pour le site d'essai, une déviation de la trajectoire du vent de 40°/100 m doit être prise pour hypothèse.

L'incertitude-type de la courbe de puissance mesurée en termes de vitesse du vent due à l'absence de mesures de la déviation de la trajectoire du vent doit être prise pour hypothèse pour la i^{e} tranche de vitesse du vent:

$$u_{M,veer,i} = \frac{1}{\sqrt{3}} |f_r - 1| v_{h,i} \quad (\text{E.31})$$

où

f_r est le facteur de correction de la déviation de la trajectoire du vent calculé ci-dessus;

$v_{h,i}$ est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu dans la tranche i .

Le Tableau E.4 donne des exemples d'incertitudes-types estimées pour les mesures de la courbe de puissance en termes de vitesse du vent dues à l'absence de mesures de la déviation de la trajectoire du vent. L'incertitude correspondante augmente en même temps que le diamètre du rotor.

Tableau E.4 – Exemples d'incertitudes-types dues à l'absence de mesures de la déviation de la trajectoire du vent

D	$u_{M,veer} / v_h$
[m]	[%]
20	0,04
40	0,1
60	0,3
80	0,6
100	0,9
120	1,2
140	1,7
160	2,1
180	2,7
200	3,2
Par hypothèse, une déviation de la trajectoire du vent extrême de 40°/100 m a été retenue pour les calculs.	

E.11.2.3.3 Mesure de la déviation de la trajectoire du vent sur la moitié du rotor

Le calcul de la REWS, conformément à l'Equation (Q.1), prend pour hypothèse une direction du vent constante pour chaque hauteur de mesure. Cette hypothèse conduit à une incertitude d'évaluation de la REWS.

L'incertitude associée à une mesure de la déviation de la trajectoire du vent sur la moitié d'un rotor doit être estimée à l'aide de la même procédure que la déviation de la trajectoire du vent sur la totalité d'un rotor (voir E.11.2.3.4), à la différence que la déviation de la trajectoire du vent sur la totalité du rotor est égale à 2,5 fois celle mesurée sur la moitié du rotor.

E.11.2.3.4 Mesure de la déviation de la trajectoire du vent sur la totalité du rotor

Le calcul de la REWS, conformément à l'Equation (Q.1), prend pour hypothèse une direction du vent constante pour chaque hauteur de mesure. Cette hypothèse conduit à une incertitude d'évaluation de la REWS. Cette incertitude doit être estimée en prenant pour hypothèse une augmentation linéaire de la déviation de la trajectoire du vent entre chaque paire de mesures de vitesse du vent à des hauteurs de mesure successives. La vitesse du vent selon cette hypothèse doit être calculée pour au moins 10 niveaux de hauteur également distribués entre chaque paire de hauteurs de mesure. La sommation, conformément à l'Equation (Q.1), doit être répétée avec tous les niveaux de hauteur couverts par l'hypothèse de profil de déviation de la trajectoire et les hauteurs de mesure, et en prenant pour hypothèse une vitesse du vent constante pour toutes les hauteurs. Il doit être pris pour hypothèse que l'écart en pourcentage entre la REWS qui en résulte et la REWS utilisant seulement les directions du vent mesurées correspond à l'incertitude-type (en pourcentage) de la vitesse du vent due au nombre limité de hauteurs de mesure de la direction du vent.

L'estimation de l'incertitude due au nombre limité de hauteurs de mesure de direction du vent doit être effectuée sur la base des moyennes de tranche des mesures de direction du vent aux différents niveaux de hauteur en fonction de la vitesse du vent finalement appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance.

NOTE Des ensembles de données de 10 min sont nécessaires pour le calcul.

E.11.2.4 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Conditions de vent – Écoulement ascendant

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude qui s'applique lorsqu'il existe moins de neuf hauteurs de mesure pour l'écoulement ascendant. Cette composante d'incertitude doit être appliquée pour les sites qui ne satisfont pas aux exigences de l'Annexe B.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M,upflow,i}$.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude peut être trouvée dans le Tableau E.5.

Tableau E.5 – Contributions d'incertitudes dues au fait que l'écoulement ascendant n'est pas connu

Nombre de hauteurs de mesure	[% de la vitesse du vent]
0 (aucune mesure de l'écoulement ascendant)	0,3 à 0,5
1 (à la hauteur du moyeu seulement)	0,15 à 0,25
2 (surface inférieure du rotor)	0,08 à 0,12
3	0,03 à 0,07
5	0 015 à 0 025
7	0,005 à 0,015

Il est à noter que cette composante d'incertitude de l'écoulement ascendant est très différente de celle envisagée dans la classification du capteur de vitesse du vent, dans laquelle l'écoulement ascendant est inclus. La seconde étudie l'imprécision de mesure de la vitesse horizontale du vent due à la présence d'une composante de vitesse verticale du vent. Ici, c'est l'influence de l'écoulement ascendant sur la performance de l'éolienne qui est étudiée. Bien qu'une vitesse horizontale du vent soit définie, la performance de l'éolienne continue à varier lorsqu'une composante verticale est présente.

E.11.2.5 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Conditions de vent – Intensité des turbulences

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'absence de mesure pour les turbulences à la hauteur du moyeu.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M,ti,i}$.

Les turbulences ne sont étudiées à aucune autre hauteur de mesure; en effet, l'Article 5 de la présente norme n'a défini la courbe de puissance que pour les turbulences à la hauteur du moyeu. Il s'agit d'un signal requis. La raison pour laquelle il est toujours inclus sous la forme d'une composante d'incertitude supplémentaire est que, dans la configuration de mesure d'un mât météorologique d'une hauteur inférieure à celle du moyeu, seules les turbulences à la hauteur du moyeu sont mesurées par un RSD. Les turbulences mesurées par un RSD sont sensiblement différentes de celles mesurées par un anémomètre à coupelles ou à ultrasons. Cela explique l'incertitude supplémentaire.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude peut être trouvée dans le Tableau E.6.

Tableau E.6 – Contributions d'incertitudes dues au fait que l'intensité des turbulences n'est pas connue

Nombre de hauteurs de mesure	[% de la vitesse du vent]
0 (mesure <i>TI</i> imprécise en raison du RSD)	0,3 % à 0,5 %

E.11.3 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Variations saisonnières

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'influence des variations saisonnières sur la courbe de puissance. Il est à noter que certaines variations saisonnières contribuent à l'incertitude de la vitesse du vent, car elles influent sur les caractéristiques du profil du vent (cisaillement, turbulences, etc.). Ces variations sont traitées séparément.

D'autres faits, tels que l'accumulation d'insectes et/ou de boue sur les pales (p. ex. pendant une période chaude et sèche), contribuent à augmenter la rugosité de surface des pales et à réduire leur performance aérodynamique. Par conséquent, pour une même énergie cinétique du vent, la production d'énergie de l'éolienne sera inférieure lorsque les pales sont sales. Ces contributions sont prises en compte dans la composante d'incertitude $u_{M,sfx,i}$.

Clairement, ces contributions n'influent pas sur les caractéristiques du profil du vent; par conséquent, au sens propre, elles constituent des effets sur la puissance électrique. Cependant, afin de quantifier la contribution à la variation de l'*AEP*, cette composante d'incertitude est exprimée, pour plus de simplicité, comme une incertitude de la vitesse du vent.

Une amplitude par défaut de 0,7 % sur la vitesse du vent est suggérée; toutefois, l'amplitude de cette composante varie en fonction de l'emplacement du site et de la période de l'année à laquelle est réalisé l'essai de performance. Si possible, il convient de l'estimer à partir de l'expérience ou des données de variations de l'*AEP* issues du site en question.

E.11.4 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Normalisation des turbulences (ou absence de connaissances)

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la normalisation des turbulences de la courbe de puissance.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M,tinorm,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe M et en 9.1.6.

La normalisation des turbulences décrite à l'Annexe M a été conçue de manière à gérer les effets du moyennage des données sur une période de 10 min sur la courbe de puissance évaluée. L'intensité des turbulences a d'autres effets sur les courbes de puissance de l'éolienne; ces effets pourraient, par exemple, être dus à l'impact direct de l'intensité des turbulences sur l'aérodynamique ou au caractère tridimensionnel des turbulences. En fin de compte, la normalisation de l'intensité des turbulences constitue une approche fortement simplifiée de la caractérisation des variations de la vitesse du vent à court terme. Il persiste donc une incertitude de la courbe de puissance évaluée due aux effets des turbulences éventuelles, même si la procédure de normalisation des turbulences est appliquée. La normalisation des turbulences élimine souvent environ la moitié des effets observés de l'intensité des turbulences sur les courbes de puissance mesurées de l'éolienne. Il convient donc d'exécuter les étapes ci-dessous afin de calculer l'incertitude de la normalisation des turbulences:

- a) La courbe de puissance finale moyennée par tranche doit être évaluée en fonction de la puissance de sortie normalisée des turbulences, ainsi que de la puissance de sortie non normalisée des turbulences.
- b) Il doit être pris pour hypothèse que l'écart entre ces deux courbes de puissance correspond à l'incertitude maximale de la courbe de puissance normalisée des turbulences par tranche de vitesse du vent, issue de la normalisation des turbulences. L'incertitude-type issue de la normalisation des turbulences par tranche de vitesse du vent doit être calculée comme étant l'écart entre les courbes de puissance divisé par $\sqrt{3}$. L'incertitude-type doit être combinée avec les autres incertitudes de la mesure de performance de puissance pour déterminer l'incertitude-type totale, conformément à l'Annexe D.

En l'absence de normalisation des turbulences, il convient de calculer l'incertitude due à l'effet des turbulences sur la courbe de puissance comme indiqué à l'Article M.5.

E.11.5 Incertitudes de catégorie B: Méthode – Climat froid

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'influence de la mesure dans un climat froid sur la classification des anémomètres.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{M,cc,i}$.

Cette incertitude est également décrite à l'Annexe O de la présente norme.

Si une plage de températures étendue est exigée, la composante d'incertitude pour la classification du capteur doit être fondée sur un rapport de classification de classe S, ce qui est couvert par la composante d'incertitude $u_{VS,class,i}$.

Bien que la détection du givre soit recommandée, la formation de neige et de givre ne peut pas être évitée sur la structure de montage, ce qui a une influence sur la vitesse du vent mesurée. Cet aspect est couvert par la composante d'incertitude décrite ici.

Il est à noter qu'il convient de prendre en compte ces remarques pour les mesures de classe B "normales"; la classe B s'étend en effet jusqu'à -10 °C et, la plupart du temps, la neige et la glace se forment autour de 0 °C . Si une mesure est exposée à plus de quelques jours de neige et/ou de glace, cette composante d'incertitude supplémentaire doit être appliquée. Autrement, cette composante peut être fixée à zéro.

L'amplitude par défaut pour cette composante d'incertitude est comprise entre 0,5 % et 1 % de la vitesse du vent.

E.12 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent

E.12.1 Généralités

L'incertitude de direction du vent a une influence sur la courbe de puissance lors de l'étalonnage du site, ainsi qu'un effet moindre. En fonction de l'amplitude de l'incertitude sur la direction du vent par rapport à la taille de tranche pour l'étalonnage du site, les données seront assignées de façon (in)correcte à une tranche. Pour une taille de tranche de 10° et une incertitude de direction du vent de 5° , environ 39 % des données d'une tranche ont été mal assignés. Le phénomène tendra à s'équilibrer, mais peut avoir un effet sur les petits secteurs de mesure et de grandes différences entre des tranches adjacentes. Un argument similaire s'applique au filtrage du secteur de mesure de la courbe de puissance, mais dans une moindre mesure.

Ces incertitudes ne doivent s'appliquer que si le capteur de direction du vent ou son montage sont modifiés sur les sites sur lesquels un étalonnage a été réalisé.

Ce contexte est la principale raison pour laquelle la norme exige que l'incertitude de direction du vent soit évaluée afin de garantir qu'elle demeure inférieure à 5°.

L'influence de la direction du vent sur la courbe de puissance et sur l'*AEP* n'est pas quantitativement établie, et aucun facteur de sensibilité n'a été déterminé.

Etant donné que l'incertitude de direction du vent doit être consignée, l'Article E.12 donne les composantes d'incertitude minimales qui doivent être prises en compte pour l'incertitude de direction du vent. Aucune estimation de l'amplitude de ces composantes n'est donnée, mais elle doit être incluse dans une courbe de puissance consignée.

E.12.2 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons

E.12.2.1 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons – Etalonnage

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de direction du vent.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WV,cal,i}$.

La résolution du capteur de direction du vent est également incluse ici et cette valeur divisée par $2\sqrt{3}$ doit être retenue comme valeur minimale.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.2.2 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons – Indicateur du nord

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la détermination précise de l'indication du nord des capteurs par rapport à la flèche sur laquelle est installé le capteur.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WV,nm,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.2.3 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons – Orientation de la flèche

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'établissement de la direction de la flèche par rapport au nord de référence, c'est-à-dire le nord magnétique ou le nord géographique.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WV,bo,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.2.4 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons – Effets opérationnels

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'influence du mât sur la direction du vent en écoulement libre au point de mesure.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WV,oe,i}$.

Etant donné que le vent s'écoulera autour du mât, la direction du vent mesurée par le capteur peut ne pas être la direction du vent en écoulement libre. Cet effet est couvert par cette composante d'incertitude.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.2.5 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons – Angle de déclinaison magnétique

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la différence entre le nord magnétique et le nord géographique.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WV,mda,i}$ (MDA représente l'angle de déclinaison magnétique, "*magnetic declination angle*").

La correction entre le nord magnétique et le nord géographique est également associée à une incertitude.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.2.6 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – Girouette ou anémomètre à ultrasons – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de direction du vent.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dWV,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.3 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD

E.12.3.1 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD – Vérification

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la vérification du capteur de direction du vent.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WR,ver,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.3.2 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD – Surveillance

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données à partir du signal provenant de la surveillance de la direction du vent par le RSD.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WR,mon,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.3.3 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD – Variation d'écoulement

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la variation d'écoulement entre différents volumes de sonde.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WR,fv,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.3.4 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD – Alignement

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la précision de l'alignement du RSD.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WR,align,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.3.5 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD – Angle de déclinaison magnétique

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à la correction entre le nord magnétique et le nord géographique.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{WR,mda,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.12.3.6 Incertitudes de catégorie B: Direction du vent – RSD – Acquisition de données

Cette composante d'incertitude couvre l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du RSD.

Le symbole de cette composante d'incertitude est $u_{dWR,i}$.

Aucune valeur par défaut n'est donnée, mais cette composante d'incertitude doit être évaluée et consignée.

E.13 Composition des incertitudes

E.13.1 Généralités

Dans l'Article E.13, les équations et autres hypothèses concernant la composition des composantes d'incertitude à un niveau d'agrégation seront présentées et débattues. Le calcul de l'incertitude d'étalonnage du site en fonction des composantes de l'incertitude d'étalonnage du site constitue un exemple.

E.13.2 Composition des incertitudes de catégorie B relatives à la puissance électrique ($u_{P,i}$)

L'incertitude-type sur la puissance électrique pour chaque tranche, $u_{P,i}$, est calculée en combinant les incertitudes-types du transducteur de puissance, des transformateurs de courant et de tension et du système d'acquisition de données:

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P,CT,i}^2 + u_{P,VT,i}^2 + u_{P,PT,i}^2 + u_{dP,i}^2} \quad (\text{E.32})$$

où

- $u_{P,i}$ est l'incertitude de la mesure de la puissance;
- $u_{P,CT,i}$ est l'incertitude relative aux transformateurs de courant;
- $u_{P,VT,i}$ est l'incertitude relative aux transformateurs de tension;
- $u_{P,PT,i}$ est l'incertitude relative aux transducteurs de puissance;
- $u_{dP,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de puissance.

En prenant pour hypothèse les amplitudes par défaut pour ces composantes d'incertitude données dans l'Article E.5, l'incertitude-type du capteur de puissance électrique pour chaque tranche est:

$$u_{P,i} = \sqrt{\frac{(0,43\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (0,29\% P_i [\text{kW}])^2 + (7,2 \text{ kW})^2 + (0,1\% \cdot 3\,000 \text{ kW})^2}{(0,53\% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (7,8 \text{ kW})^2}} \quad (\text{E.33})$$

E.13.3 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent ($u_{V,i}$)

Les composantes d'incertitude suivantes sont combinées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à la vitesse du vent, $u_{V,i}$:

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{VHW,i}^2 + u_{VT,i}^2 + u_{AD,method,i}^2} \quad (\text{E.34})$$

où

- $u_{VHW,i}$ est l'incertitude relative au matériel utilisé et est égale à $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ ou $u_{REWS,i}$;
- $u_{VT,i}$ est l'incertitude relative à la distorsion de l'écoulement due au terrain;
- $u_{AD,method,i}$ est l'incertitude relative à la correction de la masse volumique de l'air.

E.13.4 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent par un anémomètre à coupelles ou à ultrasons ($u_{VS,i}$)

Les composantes d'incertitude suivantes sont combinées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative aux mesures de la vitesse du vent par un anémomètre à coupelles ou à ultrasons, $u_{VS,i}$:

$$u_{VS,i} = \sqrt{u_{VS,precal,i}^2 + u_{VS,postcal,i}^2 + u_{VS,class,i}^2 + u_{VS,mnt,i}^2 + u_{VS,lgt,i}^2 + u_{dVS,i}^2} \quad (\text{E.35})$$

où

- $u_{VS,precal,i}$ est l'incertitude relative au matériel utilisé et est égale à $u_{VS,i}$, $u_{VR,i}$ or $u_{REWS,i}$;
- $u_{VS,postcal,i}$ est l'incertitude relative à la distorsion de l'écoulement due au terrain;
- $u_{VS,class,i}$ est l'incertitude relative à la classification des capteurs;
- $u_{VS,mnt,i}$ est l'incertitude relative au montage des capteurs;
- $u_{VS,lgt,i}$ est l'incertitude relative à la distorsion de l'écoulement due au paratonnerre;
- $u_{dVS,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de vitesse du vent.

E.13.5 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent par un RSD ($u_{VR,i}$)

Les composantes d'incertitude suivantes sont combinées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative aux mesures de la vitesse du vent par un RSD, $u_{VR,i}$:

$$u_{VR,i} = \sqrt{u_{VR,ver,i}^2 + u_{VR,isc,i}^2 + u_{VR,class,i}^2 + u_{VR,mnt,i}^2 + u_{VR,flow,i}^2 + u_{VR,mon,i}^2} \quad (E.36)$$

où

- $u_{VR,ver,i}$ est l'incertitude relative à l'essai de vérification;
- $u_{VR,isc,i}$ est l'incertitude relative à l'essai in situ;
- $u_{VR,class,i}$ est l'incertitude relative à la classification du RSD;
- $u_{VR,mnt,i}$ est l'incertitude relative au montage du RSD;
- $u_{VR,flow,i}$ est l'incertitude relative à la variation d'écoulement sur le volume de mesure du RSD;
- $u_{VR,mon,i}$ est l'incertitude relative à la surveillance du RSD.

E.13.6 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS $u_{REWS,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont combinées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative aux mesures de la vitesse du vent exprimées comme la REWS, $u_{REWS,i}$:

$$u_{REWS,i} = \sqrt{u_{REWS,shear,i}^2 + u_{REWS,veer,i}^2} \quad (E.37)$$

où

- $u_{REWS,i}$ est l'incertitude de la vitesse du vent équivalente du rotor (REWS);
- $u_{REWS,shear,i}$ est l'incertitude due à l'influence sur la REWS de la mesure du cisaillement sur la surface du rotor;
- $u_{REWS,veer,i}$ est l'incertitude relative à la classification du RSD.

La valeur de $u_{REWS,shear,i}$ est issue de l'une des valeurs suivantes:

- $u_{veq,i}$ (voir E.13.7),
- $u_{veq,final,i}$ (voir E.13.8),
- ou déterminée à l'aide de $u_{fr,RSD,k,i}$ (voir E.13.9).

La valeur de $u_{REWS,veer,i}$ est issue de $u_{veq,i}$ (voir E.13.10).

Les composantes d'incertitude de la vitesse du vent qui sont incluses dans l'incertitude de la REWS sont fondées sur l'Equation (5) en 9.1.3.2 ou l'Equation (11) en 9.1.3.4. L'Equation (6) en 9.1.3.2 (qui pourrait également influencer l'Equation (11)) implique qu'une composante d'incertitude est associée à l'établissement de la hauteur de mesure appropriée. Etant donné que cette composante d'incertitude est réputée non significative pour une mesure réalisée sur un mât météorologique et qu'elle est incluse dans l'étalonnage d'un dispositif LIDAR conformément à l'Annexe L, le seul problème concerne les mesures SODAR, en particulier dans le cas de vitesses du vent plus élevées, où il peut se produire une "déviation du faisceau". Si un tel phénomène se produit pendant une mesure, ce fait doit être inclus comme une autre composante d'incertitude.

E.13.7 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS pour un mât météorologique significativement au-dessus de la hauteur du moyeu ou un RSD avec un mât météorologique en dessous de la hauteur du moyeu

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative aux mesures de la vitesse du vent d'un RSD.

La REWS doit être considérée comme la mesure d'une vitesse du vent unique. L'incertitude-type totale de la REWS dans la tranche de vitesse du vent i peut être exprimée comme suit:

$$u_{v_{eq},i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M u_{v_{eq},k,i} u_{v_{eq},l,i} \rho_{k,l,i} \quad (\text{E.38})$$

où

M	est le nombre de composantes d'incertitude de v_{eq} ;
i	est la tranche de vitesse du vent qui fait référence au moyennage de tranche de la courbe de puissance;
$u_{v_{eq},k,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type k de v_{eq} dans la tranche de vitesse du vent i ;
$u_{v_{eq},l,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type l de v_{eq} dans la tranche de vitesse du vent i ;
$\rho_{k,l,i}$	est le coefficient de corrélation entre la composante d'incertitude k à la hauteur m et n dans la tranche de vitesse du vent i .

Il est à noter que les facteurs de sensibilité ne sont pas explicitement inclus ici, car ils sont présents dans l'équation ci-dessous.

Les composantes d'incertitude de v_{eq} dans la tranche de vitesse du vent i doivent être calculées à partir des composantes d'incertitude des mesures de la vitesse du vent dans les hauteurs de mesure uniques à l'aide de la méthode de propagation d'erreur:

$$u_{v_{eq},k,i}^2 = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L c_{m,i} u_{v_m,k,i} c_{n,i} u_{v_n,k,i} \rho_{m,n,k,i} \quad (\text{E.39})$$

où

L	est le nombre de hauteurs de mesure sur la surface du rotor;
$u_{v_m,k,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type k de la mesure de la vitesse du vent à la hauteur m dans la tranche de vitesse du vent i ;
$u_{v_n,k,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type k de la mesure de la vitesse du vent à la hauteur n dans la tranche de vitesse du vent i ;
$c_{m,i}$	est le facteur de sensibilité de v_{eq} sur la vitesse du vent à la hauteur m dans la tranche de vitesse du vent i ;
$c_{n,i}$	est le facteur de sensibilité de v_{eq} sur la vitesse du vent à la hauteur n dans la tranche de vitesse du vent i ;
$\rho_{m,n,k,i}$	est le coefficient de corrélation entre la composante d'incertitude k aux hauteurs m et n dans la tranche de vitesse du vent i .

Les facteurs de sensibilité $c_{m,i}$ et $c_{n,i}$ sont issus de la définition de la REWS à l'aide de la méthode de propagation d'erreur:

$$c_{m,i} = \frac{\partial v_{eq,i}}{\partial v_{m,i}} = \frac{A_m}{A} \left(\frac{v_{m,i}}{v_{eq,i}} \right)^2 \quad (E.40)$$

où

A_m est le segment de rotor attribué à la mesure de la vitesse du vent à la hauteur m conformément à l'Equation (6) en 9.1.3.2;

A est la surface balayée par le rotor;

$v_{m,i}$ est la vitesse du vent à la hauteur m dans la tranche de vitesse du vent i ;

$v_{eq,i}$ est la vitesse du vent équivalente dans la tranche i .

Pour l'application de l'Equation (E.40), la vitesse du vent mesurée aux différentes hauteurs de mesure, $v_{m,i}$, doit être moyennée par tranche en fonction de la vitesse du vent finalement appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance (vitesse du vent normalisée en fonction de la masse volumique de l'air et du cisaillement du vent).

L'Equation (E.39) utilisée conjointement à l'Equation (E.40) est simplifiée si une corrélation complète ou une absence de corrélation entre les composantes d'incertitude à différentes hauteurs de mesure est prise pour hypothèse. Il convient d'appliquer les coefficients de corrélation suggérés au Tableau E.7 pour le calcul des incertitudes de v_{eq} . Des coefficients de corrélation inférieurs ne doivent être utilisés que s'ils sont évidents.

Tableau E.7 – Hypothèses suggérées pour les corrélations des incertitudes de mesure entre différentes hauteurs de mesure²⁶

Composante	Coefficient de corrélation des incertitudes entre différentes hauteurs de mesure	Explication
Mesure du cisaillement du vent par des anémomètres à coupelles		
Etalonnage de la soufflerie	1	Un étalonnage dans la même soufflerie est exigé; forte corrélation des incertitudes des étalonnages de différents anémomètres à coupelles
Classification des anémomètres à coupelles	1	Les anémomètres à différentes hauteurs réalisent les mesures dans des conditions climatiques très similaires
Montage des anémomètres à coupelles	1, 0	1, en cas de montage sur la flèche et de configuration de flèche identique; 0, si un anémomètre est monté en tête de mât et que l'autre est monté sur la flèche
Système d'acquisition de données	0	Différents canaux d'entrée appliqués
Effets du site dus à la distance entre le mât météorologique de référence et l'éolienne à l'essai.	1	Comme première approximation, il peut être pris pour hypothèse que les effets du site sont identiques pour la plage de hauteurs du rotor
Incertitude due au nombre limité de mesures sur la plage de hauteurs du rotor	1	Pour une première approximation, cette incertitude est entièrement corrélée entre

²⁶ La normalisation de la masse volumique de l'air conduit à une incertitude supplémentaire pour la détermination de la vitesse du vent. Cette composante est produite après le moyennage des vitesses du vent au niveau du rotor et doit être ajoutée pour l'évaluation finale des incertitudes de vitesse du vent.

Composante	Coefficient de corrélation des incertitudes entre différentes hauteurs de mesure	Explication
		les hauteurs de mesure.
Mesure du cisaillement du vent par un RSD		
Essai de vérification	1	Normalement, les conditions des capteurs de référence à différentes hauteurs sont très similaires. La sensibilité de la précision du RSD à la hauteur de mesure peut être ignorée
Analyse/classification de la sensibilité	1	Classification réalisée dans des conditions très similaires à différentes hauteurs. Le degré de dépendance de la sensibilité du RSD aux conditions environnementales à la hauteur de mesure peut être ignoré
Incertainitude issue du contrôle à l'aide du mât météorologique	1	Même hypothèse d'incertitude pour toutes les hauteurs
Incertainitude due à la variation de l'écoulement sur différents volumes de sonde à la même hauteur	1	Normalement, un effet assez similaire est attendu à différentes hauteurs de mesure. La sensibilité de l'erreur à la hauteur de mesure peut être ignorée
Montage	1	Effet similaire du montage du système à différentes hauteurs de mesure
Effets du site dus à la distance entre la mesure et l'éolienne à l'essai	1	Comme première approximation, il peut être pris pour hypothèse que les effets du site sont identiques pour la plage de hauteurs du rotor
Incertainitude due au nombre limité de mesures sur la plage de hauteurs du rotor	1	Pour une première approximation, cette incertitude est entièrement corrélée entre les hauteurs de mesure

NOTE Si l'hypothèse est que, pour toutes les composantes, le coefficient de corrélation est égal à 1 et que toutes les composantes sont les mêmes pour chaque hauteur, cette procédure est simplifiée au point que l'incertitude peut être calculée comme décrit à l'Article E.6, en prenant $v_{eq,i}$ à la place de v_i . Pour les valeurs fixes (par exemple l'étalonnage) cette valeur peut être utilisée pour $v_{eq}v_{eq,i}$.

E.13.8 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS pour un mât météorologique à la hauteur du moyeu + un RSD pour la mesure du cisaillement avec une vitesse du vent absolue

L'incertitude de mesure de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu par un anémomètre à coupelles ou à ultrasons et l'incertitude de mesure du cisaillement du vent par un RSD peuvent être traitées comme étant indépendantes l'une de l'autre. La propagation d'erreur selon l'Equation (11) en 9.1.3.4 mène à l'équation suivante pour l'incertitude de la REWS finale:

$$u_{v_{eq},final,i}^2 = f_{r,X,i}^2 u_{v_h,i}^2 + v_{h,i}^2 u_{f_{r,X,i}}^2 \quad (E.41)$$

où

$u_{v_{eq},final,i}$ est l'incertitude-type de la REWS finale dans la tranche i ;

$f_{r,X,i}$ est le facteur de correction du cisaillement du vent dans la tranche de vitesse du vent i ;

$v_{h,i}$ est la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu dans la tranche i par l'anémomètre à coupelles ou à ultrasons;

$u_{v_{h,i}}$ est l'incertitude-type de $v_{h,i}$ dans la tranche de vitesse du vent i ;

$u_{f_{r,X,i}}$ est l'incertitude-type de $f_{r,X,i}$ dans la tranche de vitesse du vent i .

L'incertitude du facteur de correction du cisaillement du vent (propagation d'erreur selon l'Equation (9) et l'Equation (10) en 9.1.3.3):

$$u_{f_{r,X,i}}^2 = \frac{1}{v_{h,X,i}^2} u_{v_{eq,X,i}}^2 + \frac{v_{eq,X,i}^2}{v_{h,X,i}^4} u_{v_{h,X,i}}^2 - 2 \frac{v_{eq,X,i}}{v_{h,X,i}^3} u_{v_{eq,X,i}} u_{v_{h,X,i}} \rho_{u_{v_{eq,X,i}}, u_{v_{h,X,i}}} \quad (E.42)$$

où

$v_{h,X,i}$ est la vitesse du vent mesurée par le RSD dans la tranche i ;

$u_{v_{h,X,i}}$ est l'incertitude-type de $v_{h,X,i}$;

$v_{eq,X,i}$ est la REWS mesurée par le RSD dans la tranche i ;

$u_{v_{eq,X,i}}$ est l'incertitude-type de $v_{eq,X,i}$ dans la tranche i ;

$\rho_{u_{v_{eq,X,i}}, u_{v_{h,X,i}}}$ est le coefficient de corrélation entre les composantes d'incertitude $u_{v_{eq,X,i}}$ et $u_{v_{h,X,i}}$ dans la tranche i .

Dans la mesure où $v_{eq,X,i}$ et $v_{h,X,i}$ ont les mêmes types de sous-composantes d'incertitude décrites au Tableau E.7 et en prenant pour hypothèse que ces sous-composantes sont indépendantes l'une de l'autre, l'Equation (E.42) est égale à:

$$u_{f_{r,X,i}}^2 = \sum_{k=1}^M \frac{1}{v_{h,X,i}^2} u_{v_{eq,X,k,i}}^2 + \frac{v_{eq,X,i}^2}{v_{h,X,i}^4} u_{v_{h,X,k,i}}^2 - 2 \frac{v_{eq,X,i}}{v_{h,X,i}^3} u_{v_{eq,X,k,i}} u_{v_{h,X,k,i}} \rho_{u_{v_{eq,X,k,i}}, u_{v_{h,X,k,i}}} \quad (E.43)$$

où

$u_{v_{eq,X,k,i}}$ est la composante d'incertitude-type k de la REWS mesurée par le RSD dans la tranche i , à des fins d'analyse conformément à l'Equation (E.39);

$u_{v_{h,X,k,i}}$ est la composante d'incertitude-type k de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu mesurée par le RSD dans la tranche i ;

$\rho_{u_{v_{eq,X,k,i}}, u_{v_{h,X,k,i}}}$ est le coefficient de corrélation entre les composantes d'incertitude-type $u_{v_{eq,X,k,i}}$ et $u_{v_{h,X,k,i}}$ dans la tranche i ;

M est le nombre de composantes d'incertitude de $v_{eq,X}$ et de $v_{h,X}$.

Pour l'application de l'Equation (E.43), $v_{h,X,i}$ et $v_{eq,X,i}$ sont issus du moyennage de tranche de la REWS et de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu mesurée par le RSD en fonction de la vitesse du vent finalement appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance (masse volumique de l'air normalisée et vitesse du vent après correction du cisaillement du vent). Les coefficients de corrélation entre les composantes d'incertitude-type de la REWS et de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu mesurée par le RSD $\rho_{u_{v_{eq,X,k,i}}, u_{v_{h,X,k,i}}}$ doivent être estimés à partir des résultats de l'essai de vérification et de l'essai de sensibilité/de la classification du RSD. Dans certains cas, l'hypothèse de coefficients de corrélation proches de 1 peut se justifier.

L'Equation (E.43), lorsqu'elle est utilisée conjointement à l'Equation (E.41) et à l'Equation (E.39), permet d'évaluer toutes les composantes d'incertitude-type de la REWS finale. Ces sous-composantes doivent être mises en œuvre dans les Equations (E.3) et (E.4).

Conformément à l'Equation (E.41), l'incertitude totale de la REWS finale est supérieure à l'incertitude de la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu par l'anémomètre à ultrasons ou à coupelles (au moins dès que le facteur de correction du cisaillement du vent dépasse 1). L'incertitude augmente à cause de l'incertitude du facteur de correction du cisaillement du vent. Conformément à l'Equation (E.43), cette incertitude supplémentaire disparaît si les incertitudes de la REWS et la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu par le RSD sont entièrement corrélées ($\rho_{u_{\text{veq},X}, u_{v_{h,X}}, k, i} = 1$), mais aussi si la REWS est égale à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu mesurée par le RSD.

NOTE En prenant pour hypothèse que tous les coefficients de corrélation sont égaux à 1 et que $u_{v_{\text{eq},X}, k, i}$ est égal à $u_{v_{h,X}, k, i}$ (voir E.13.7), l'équation pour $u_{f_{r,X}, i}^2$ est simplifiée comme suit:

$$u_{f_{r,X}, i} = \left(\frac{v_{h,X,i} - v_{\text{eq},X,i}}{v_{h,X,i}^2} \right) \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^M u_{v_{h,X}, k, i}^2} \quad (\text{E.44})$$

où

- $v_{h,X,i}$ est la vitesse du vent mesurée par le RSD dans la tranche i ;
- $u_{h,X,k,i}$ est l'incertitude-type de la composante k de $v_{h,X,i}$ ou de $v_{\text{eq},X,i}$;
- $v_{\text{eq},X,i}$ est la REWS mesurée par le RSD dans la tranche i .

E.13.9 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS pour un mât météorologique à la hauteur du moyeu + un RSD pour la mesure du cisaillement avec une vitesse du vent relative

Une analyse de la sensibilité et un essai de vérification du RSD pour les mesures du cisaillement du vent à la place des mesures de la vitesse du vent absolue peuvent être disponibles. Cela signifie que la précision du RSD en termes de mesures du cisaillement du vent est vérifiée lors de l'essai de vérification, mais aussi que la sensibilité de la mesure du cisaillement du vent sur les variables environnementales fait l'objet d'un essai pour la classification du RSD. Si une telle analyse de la sensibilité et un tel essai de vérification du RSD sont présents, il est particulièrement utile, à des fins d'évaluation des incertitudes, d'introduire une mesure de la vitesse du vent relative par le RSD:

$$v_{r,\text{RSD},m} = \frac{v_{m,\text{RSD}}}{v_{h,\text{RSD}}} \quad (\text{E.45})$$

où

- $v_{r,\text{RSD},m}$ est la vitesse du vent relative mesurée par le RSD à la hauteur m par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du moyeu mesurée par le RSD;
- $v_{h,\text{RSD}}$ est la vitesse du vent mesurée par le RSD à la hauteur du moyeu;
- $v_{m,\text{RSD}}$ est la vitesse du vent mesurée par le dispositif de télédétection à la hauteur m .

Le facteur de correction de cisaillement du vent défini à l'Equation (9) en 9.1.3.3 peut alors être réécrit comme suit:

$$f_{r,\text{RSD}} = \left(\sum_{m=1}^L \frac{A_m}{A} v_{r,\text{RSD},m}^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{E.46})$$

où

- A_m est le segment de rotor attribué à la mesure de la vitesse du vent à la hauteur m conformément à l'Equation (5) en 9.1.3.2;
- A est la surface balayée par le rotor;
- L est le nombre de hauteurs de mesure sur la plage de hauteurs du rotor.

L'Equation (E.41) peut ensuite être appliquée pour évaluer l'incertitude de la REWS finale avec les composantes d'incertitude du facteur de correction du cisaillement du vent dans la tranche de vitesse du vent i obtenue à partir de:

$$u_{f_{r,RSD},k,i}^2 = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L c_{v_{r,RSD},m,i} u_{v_{r,RSD},m,k,i} c_{v_{r,RSD},n,i} u_{v_{r,RSD},n,k,i} \rho_{r,m,n,k,i} \quad (\text{E.47})$$

où

- L est le nombre de hauteurs de mesure sur la plage de hauteurs du rotor;
- $u_{v_{r,RSD},m,k,i}$ est la composante de l'incertitude-type k de la mesure de la vitesse du vent relative à la hauteur m dans la tranche de vitesse du vent i ;
- $u_{v_{r,RSD},n,k,i}$ est la composante de l'incertitude-type k de la mesure de la vitesse du vent relative à la hauteur n dans la tranche de vitesse du vent i ;
- $c_{v_{r,RSD},m,i}$ est le facteur de sensibilité de $f_{r,RSD}$ sur la mesure de la vitesse du vent relative à la hauteur m dans la tranche de vitesse du vent i ;
- $c_{v_{r,RSD},n,i}$ est le facteur de sensibilité de $f_{r,RSD}$ sur la mesure de la vitesse du vent relative à la hauteur n dans la tranche de vitesse du vent i .

Les facteurs de sensibilité $c_{v_{r,RSD},m,i}$ et $c_{v_{r,RSD},n,i}$ sont:

$$c_{v_{r,RSD},m,i} = \frac{\partial f_{r,RSD,i}}{\partial v_{r,RSD,m,i}} = \frac{A_m}{A} \left(\frac{v_{r,RSD,m,i}}{f_{r,RSD,i}} \right)^2 \quad (\text{E.48})$$

Les composantes d'incertitude données au Tableau E.7 doivent être appliquées, mais en termes de mesures de la vitesse du vent relative au RSD plutôt qu'en termes de mesures de la vitesse du vent absolue. En outre, il doit être pris pour hypothèse les mêmes coefficients de corrélation des composantes d'incertitude entre deux hauteurs de mesure, comme décrit au Tableau E.7, dans le cadre des mesures de la vitesse du vent relative, sauf s'il est démontré que d'autres valeurs sont présentes.

La vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu par l'anémomètre à coupelles ou à ultrasons v_h , le facteur de correction du cisaillement du vent $f_{r,RSD}$ et les vitesses du vent relatives $v_{r,RSD}$ mesurées par le RSD doivent être moyennés par tranche par rapport à la vitesse du vent finale appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance pour l'application des Equations (E.41), (E.47) et (E.48) (vitesse du vent normalisée à la masse volumique de l'air et corrigée du cisaillement du vent).

E.13.10 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent selon la REWS en raison de la déviation de la trajectoire du vent sur l'ensemble du rotor $u_{REWS,veer,i}$

La REWS (en fonction de la déviation de la trajectoire du vent, conformément à l'Annexe Q) dépend des vitesses du vent et des directions du vent sur la plage de hauteurs du rotor. Les incertitudes des mesures de la direction du vent et de la vitesse du vent peuvent souvent être traitées indépendamment l'une de l'autre. L'Equation (E.38) en E.13.7 devient alors:

$$u^2_{v_{eq},i} = \sum_{k=1}^M u^2_{v_{eq},k,i} + \sum_{l=1}^N u^2_{v_{eq},l,i} \quad (E.49)$$

où

M	est le nombre de sous-composantes d'incertitude de v_{eq} relatives aux mesures de la vitesse du vent;
i	est la tranche de vitesse du vent qui fait référence au moyennage de tranche de la courbe de puissance;
$u_{v_{eq},k,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type k de v_{eq} relative aux mesures de la vitesse du vent dans la tranche de vitesse du vent i ;
N	est le nombre de sous-composantes d'incertitude de v_{eq} relatives aux mesures de la direction du vent;
$u_{v_{eq},l,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type k de v_{eq} relative aux mesures de la direction du vent dans la tranche de vitesse du vent i .

Le terme de gauche de cette équation couvre toutes les incertitudes de mesure de la vitesse du vent de la REWS et doit être traité conformément à l'Article E.8, alors que les facteurs de sensibilité donnés dans les Equations (E.39) et (E.49) doivent être multipliés par la troisième puissance de $\cos(\phi_m)$, où m est la différence de direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu à la hauteur de mesure m . Ce facteur doit également être introduit dans l'Equation (E.46) pour la définition du facteur de correction du cisaillement du vent.

Le terme de droite dans cette Equation (E.49) couvre toutes les incertitudes de mesure de la direction du vent de la REWS. Comme expliqué en E.8.1, l'une des difficultés de l'évaluation de cette incertitude est liée au fait que les incertitudes des mesures de la direction du vent aux différents niveaux de hauteur sont corrélées les unes aux autres. Comme pour l'Equation (E.39), les sous-composantes d'incertitude sur la direction du vent de v_{eq} dans la tranche de vitesse du vent i doivent être calculées à partir des composantes d'incertitude des mesures de la direction du vent dans les hauteurs de mesure uniques à l'aide de la méthode de propagation d'erreur:

$$u^2_{v_{eq},l,i} = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L c_{m,i} u_{v_m,l,i} c_{n,i} u_{v_n,l,i} \rho_{m,n,l,i} \quad (E.50)$$

où

L	est le nombre de hauteurs de mesure sur la plage de hauteurs du rotor;
$u_{v_m,l,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type l de la mesure de la direction du vent à la hauteur m relative à la hauteur du moyeu dans la tranche de vitesse du vent i ;
$u_{v_n,l,i}$	est la sous-composante de l'incertitude-type l de la mesure de la direction du vent à la hauteur n relative à la hauteur du moyeu dans la tranche de vitesse du vent i ;
$c_{m,i}$	est le facteur de sensibilité de v_{eq} sur la direction du vent à la hauteur m relative à la hauteur du moyeu dans la tranche de vitesse du vent i ;
$c_{n,i}$	est le facteur de sensibilité de v_{eq} sur la direction du vent à la hauteur n relative à la hauteur du moyeu dans la tranche de vitesse du vent i ;
$\rho_{m,n,l,i}$	est le coefficient de corrélation entre la composante d'incertitude-type l de la direction du vent mesurée à la hauteur m et à la hauteur n par rapport à la hauteur du moyeu dans la tranche de vitesse du vent i (tranche de vitesse du vent par rapport à la courbe de puissance).

Les facteurs de sensibilité $c_{m,i}$ et $c_{n,i}$ sont issus de la définition de la REWS en fonction de la déviation de la trajectoire du vent à l'aide de la méthode de propagation d'erreur:

$$c_{m,i} = \frac{\partial v_{eq,i}}{\partial v_{m,i}} = -\sin(\varphi_{m,i}) \cos^2(\varphi_{m,i}) \frac{A_m}{A} \frac{v_{m,i}^3}{v_{eq,i}^2} \quad (E.51)$$

où

A_m est le segment de rotor attribué à la mesure de la vitesse du vent à la hauteur m conformément à l'Equation (5) en 9.1.3.2;

A est la surface balayée par le rotor;

$\varphi_{m,i}$ est la direction du vent à la hauteur m par rapport à la direction du vent à la hauteur du moyeu dans la tranche de vitesse du vent i ;

$v_{m,i}$ est la vitesse du vent à la hauteur m dans la tranche de vitesse du vent i ;

$v_{eq,i}$ est la vitesse du vent équivalente dans la tranche i .

Pour l'application de l'Equation (E.40), les directions du vent $\varphi_{m,i}$ et les vitesses du vent $v_{m,i}$ relatives mesurées aux différentes hauteurs de mesure doivent être moyennées par tranche en fonction de la vitesse du vent finalement appliquée pour l'évaluation de la courbe de puissance (masse volumique de l'air normalisée, vitesse du vent après correction du cisaillement du vent ou de la déviation de la trajectoire du vent).

L'Equation (E.50) utilisée conjointement à l'Equation (E.51) est simplifiée s'il est pris pour hypothèse une corrélation complète, l'absence de corrélation ou la présence d'une anticorrélation entre les composantes d'incertitude aux différentes hauteurs de mesure. Les coefficients de corrélation suggérés au Tableau E.8 doivent être appliqués pour le calcul des incertitudes en termes de direction du vent de v_{eq} . Des coefficients de corrélation inférieurs ne doivent être utilisés que s'ils sont évidents et que si les données adéquates sont consignées.

Tableau E.8 – Hypothèses de corrélation suggérées pour les incertitudes de mesure de la direction du vent à différentes hauteurs de mesure

Composante	Coefficient de corrélation des incertitudes entre différentes hauteurs de mesure	Explication
Mesure de la direction du vent relative par des girouettes ou des anémomètres à ultrasons		
Etalonnage de la soufflerie des girouettes utilisées aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	0,5	L'incertitude de l'étalonnage des girouettes individuelles est fondamentalement corrélée. Par contre, étant donné que les différences de direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu aux hauteurs m et n incluent la mesure de la direction à la hauteur du moyeu, un coefficient de corrélation de 0,5 est suggéré.
Influence du mât météorologique sur les mesures de la direction du vent aux hauteurs m , n et à la hauteur du moyeu	0,5; 1	Si les girouettes aux deux hauteurs m et n sont montées de la même manière par rapport à la même structure de mât, les incertitudes sont entièrement corrélées sur les deux hauteurs m et n . L'incertitude elle-même devient toutefois égale à 0 si la girouette à la hauteur du moyeu est aussi influencée de la même manière par le mât météorologique. Si les girouettes aux deux hauteurs m et n ne sont pas montées de la même manière par rapport à la structure de mât ou que la structure du mât est très différente aux deux hauteurs m et n , les incertitudes et ces deux hauteurs peuvent être traitées comme étant non corrélées. Par contre, étant donné que la différence de direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu aux deux hauteurs m et n inclut la mesure de la direction à la hauteur du moyeu, un coefficient de corrélation de 0,5 est suggéré pour ce cas.
Mise au nord de la mesure de la direction du vent aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	0,5	L'incertitude de la mise au nord des girouettes individuelles est fondamentalement non corrélée. Par contre, étant donné que la direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu aux deux hauteurs m et n inclut la mesure de la direction à la hauteur du moyeu, un coefficient de corrélation de 0,5 est suggéré.
Système d'acquisition de données (DAS) utilisé pour surveiller les girouettes aux hauteurs m , n et à la hauteur du moyeu	0,5	L'incertitude des canaux DAS des girouettes individuelles est souvent fondamentalement non corrélée. Par contre, étant donné que les différences de direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu aux deux hauteurs m et n incluent la mesure de la direction à la hauteur du moyeu, un coefficient de corrélation de 0,5 est suggéré.
Mesure de la direction du vent relative par un RSD		
Etalonnage de la soufflerie des girouettes de référence utilisées pour les essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	0,5; 1	Les incertitudes de la mesure de référence des essais de vérification sont fondamentalement non corrélées aux deux hauteurs m et n . Par contre, étant donné que les différences de direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu aux deux hauteurs m et n incluent la mesure de la direction à la hauteur du moyeu, un coefficient de corrélation de 0,5 est suggéré. Une exception se produit lorsque le même essai de vérification est utilisé aux deux hauteurs m et n (par exemple, si le mât utilisé pour l'essai de vérification ne couvre pas l'ensemble du rotor). Les incertitudes sont alors entièrement
Mise au nord des girouettes de référence utilisées pour les essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	0,5; 1	
Système d'acquisition de données (DAS) utilisé pour surveiller les girouettes de référence appliquées pour les essais de vérification aux hauteurs m et n et à la	0,5; 1	

Composante	Coefficient de corrélation des incertitudes entre différentes hauteurs de mesure	Explication
hauteur du moyeu		corrélées entre les deux hauteurs m et n . Toutefois, l'incertitude elle-même correspond à 0 si cette vérification est aussi appliquée à la hauteur du moyeu.
Ecart moyen entre la mesure du RSD et la mesure de référence lors des essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	0,5; 1	
Incertitude statistique des essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	0,5; 1	
Incertitude des essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu à cause d'un possible désalignement du RSD	1	L'incertitude est entièrement corrélée sur les hauteurs m et n . L'incertitude correspondante est toutefois égale à zéro pour toutes les hauteurs m et n étant donné que l'erreur de désalignement s'annule lors de l'évaluation de la différence entre les directions du vent aux hauteurs m et n par rapport à la hauteur du moyeu.
Incertitude des essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu causée par l'hypothèse de conditions de vent égales sur les volumes de sonde du RSD.	1	Ces incertitudes sont fortement corrélées sur les hauteurs m et n . Les incertitudes respectives sont toutefois proches de zéro étant donné que l'influence sur la mesure de la direction du vent à la hauteur m (ou n) et à la hauteur du moyeu s'annule lors de l'évaluation de la différence entre les directions du vent.
Incertitude des essais de vérification aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu causée par une possible séparation entre le centre du volume de mesure du RSD et la position du mât de référence	1	
Incertitude due à la sensibilité des mesures du RSD et aux variables environnementales	1	
Possible désalignement du RSD lors de l'essai de courbe de puissance	1	Ces incertitudes sont fortement corrélées sur les hauteurs m et n . Les incertitudes respectives sont toutefois égales à zéro pour toutes les hauteurs m et n étant donné que l'influence sur la mesure de la direction du vent à la hauteur m (ou n) et à la hauteur du moyeu s'annule lors de l'évaluation de la différence entre les directions du vent.
Hypothèse de conditions de vent égales sur tous les volumes de sonde du RSD aux hauteurs m et n et à la hauteur du moyeu	1	Ces incertitudes sont fortement corrélées sur les hauteurs m et n . Les incertitudes respectives sont toutefois proches de zéro étant donné que l'influence sur la mesure de la direction du vent à la hauteur m (ou n) et à la hauteur du moyeu s'annule lors de l'évaluation de la différence entre les directions du vent.
Surveillance du vent à l'aide d'un mât météorologique lors de l'essai de courbe de puissance	0,5; 1	Si le mât météorologique de surveillance couvre les deux hauteurs m et n avec des girouettes différentes, les incertitudes de la surveillance sont fondamentalement non corrélées aux deux hauteurs m et n . Par contre, étant donné que la différence de direction du vent par rapport à la hauteur du moyeu aux deux hauteurs m et n inclut la mesure de la direction à la hauteur du moyeu, un coefficient de corrélation de 0,5 est suggéré dans ce cas. Si le mât de surveillance ne fournit qu'une hauteur de mesure qui peut être utilisée pour vérifier la mesure du RSD aux hauteurs m et n , l'incertitude est entièrement corrélée sur les hauteurs m et n . L'incertitude correspondante est toutefois proche de zéro pour toutes les hauteurs m et n étant donné que l'incertitude s'annule lors de

Composante	Coefficient de corrélation des incertitudes entre différentes hauteurs de mesure	Explication
		l'évaluation de la différence entre les directions du vent à la hauteur m (ou n) et à la hauteur du moyeu.

E.13.11 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la vitesse du vent en raison de la distorsion de l'écoulement due à l'étalonnage du site $u_{VT,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à un étalonnage du site, $u_{VT,i}$:

$$u_{VT,i,j} = \sqrt{u_{VT,precal,i,j}^2 + u_{VT,postcal,i,j}^2 + u_{VT,class,i,j}^2 + u_{VT,mnt,i,j}^2 + u_{VT,coc,i,j}^2 + u_{VT,rmv,i,j}^2 + u_{VT,sv,i,j}^2 + u_{dVT,i,j}^2 + s_{VT}^2} \quad (E.52)$$

où

$u_{VT,i,j}$	est l'incertitude de l'étalonnage du site;
$u_{VT,precal,i,j}$	est l'incertitude relative à l'étalonnage des anémomètres;
$u_{VT,postcal,i,j}$	est l'incertitude relative au post-étalonnage ou à l'étalonnage in situ des anémomètres;
$u_{VT,class,i,j}$	est l'incertitude relative à la classification des capteurs;
$u_{VT,mnt,i,j}$	est l'incertitude relative au montage des capteurs;
$u_{VT,coc,i,j}$	est l'incertitude relative à la variation de la valeur de correction entre les tranches;
$u_{VT,rmv,i,j}$	est l'incertitude relative à l'enlèvement du capteur de direction du vent entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance;
$u_{VT,sv,i,j}$	est l'incertitude relative à la variation saisonnière entre l'étalonnage du site et l'essai de performance de puissance;
$u_{dVT,i,j}$	est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de vitesse du vent;
s_{VT}	est l'incertitude-type de catégorie A de l'étalonnage du site, voir C.6.1.

Pour obtenir l'incertitude dans une tranche de vitesse du vent sur tous les secteurs directionnels, la moyenne pondérée doit être utilisée:

$$u_{VT,i} = \frac{\sum_j u_{VT,i,j} N_{i,j}}{\sum_j N_{i,j}} \quad (E.53)$$

où $N_{i,j}$ est le nombre d'ensembles de données de courbe de puissance pour la tranche de vitesse du vent i et la tranche de direction du vent j .

E.13.12 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la température $u_{T,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B pour la température, $u_{T,i}$:

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T,cal,i}^2 + u_{T,shield,i}^2 + u_{T,mnt,i}^2 + u_{dT,i}^2} \quad (E.54)$$

où

- $u_{T,i}$ est l'incertitude de la mesure de la température;
- $u_{T,cal,i}$ est l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de température;
- $u_{T,shield,i}$ est l'incertitude relative à la protection contre le rayonnement du capteur de température;
- $u_{T,mnt,i}$ est l'incertitude relative au montage du capteur de température;
- $u_{dT,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de température.

En prenant les hypothèses suivantes:

- L'incertitude-type du capteur de température est égale à 0,5 °C.
- La protection contre le rayonnement du capteur de température est égale à 2 °C.
- L'incertitude-type due aux effets de montage du capteur de température dépend de la distance verticale par rapport à la hauteur du moyeu. Le capteur de température étant monté à moins de 10 m de la hauteur du moyeu, l'hypothèse est une incertitude-type de 1/3 °C.
- En prenant pour hypothèse une plage de températures de 40 °C du canal de mesure et une incertitude-type du système d'acquisition de données égale à 0,1 % de cette plage.

Le calcul numérique de l'incertitude-type de la température de l'air dans chaque tranche est:

$$u_{T,i} = \sqrt{(0,5K)^2 + (2,0K)^2 + (0,3K)^2 + (0,1 \% \cdot 40K)^2} = 2,1K \quad (E.55)$$

E.13.13 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la pression $u_{B,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à la pression, $u_{B,i}$:

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B,cal,i}^2 + u_{B,mnt,i}^2 + u_{dB,i}^2} \quad (E.56)$$

où

- $u_{B,i}$ est l'incertitude de la mesure de la pression;
- $u_{B,cal,i}$ est l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de pression;
- $u_{B,mnt,i}$ est l'incertitude relative au montage du capteur de pression;
- $u_{dB,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal de pression.

En prenant les hypothèses suivantes:

- L'incertitude-type du capteur de pression est égale à 3,0 hPa. Il est pris l'hypothèse que la pression est corrigée à la hauteur du moyeu conformément à l'ISO 2533 (qui, pour une atmosphère normale et une différence de hauteur de 98 m entre le capteur et le moyeu, est égale à 11,7 hPa). L'incertitude-type due au déploiement est estimée être égale à 10 % de la correction, c'est-à-dire 1,17 hPa.
- En prenant pour hypothèse une plage de pressions de 100 hPa du canal de mesure et une incertitude-type du système d'acquisition de données égale à 0,1 % de cette plage.

Le calcul numérique de l'incertitude-type de la pression atmosphérique est:

$$u_{B,i} = \sqrt{(3,0hPa)^2 + (1,17hPa)^2 + (0,1 \% \cdot 100hPa)^2} = 3,2 hPa \quad (E.57)$$

E.13.14 Composition des incertitudes pour la mesure de l'humidité $u_{RH,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont combinées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à l'humidité, $u_{RH,i}$:

$$u_{RH,i} = \sqrt{u_{RH,cal,i}^2 + u_{RH,mnt,i}^2 + u_{dRH,i}^2} \quad (E.58)$$

où

- $u_{RH,i}$ est l'incertitude de la mesure de l'humidité relative;
- $u_{RH,cal,i}$ est l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur d'humidité relative;
- $u_{RH,mnt,i}$ est l'incertitude relative au montage du capteur d'humidité relative;
- $u_{dRH,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal d'humidité relative.

En prenant les hypothèses suivantes:

- L'incertitude-type du capteur d'humidité relative est égale à 1 %.
- L'incertitude relative au montage du capteur est de 0,1 %.
- En prenant pour hypothèse une plage de pressions de 100 % du canal de mesure et une incertitude-type du système d'acquisition de données égale à 0,1 % de cette plage.

Le calcul numérique de l'incertitude-type de l'humidité relative est:

$$u_{RH,i} = \sqrt{(1,0\%)^2 + (0,1\%)^2 + (0,1\% \cdot 100\%)^2} = 1,0\% \quad (E.59)$$

E.13.15 Composition des incertitudes pour les composantes relatives à la méthode $u_{M,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à la méthode, $u_{M,i}$:

$$u_{M,i} = \sqrt{u_{M,shear,i}^2 + u_{M,veer,i}^2 + u_{M,upflow,i}^2 + u_{M,ti,i}^2 + u_{M,sfx,i}^2 + u_{M,tinorm,i}^2 + u_{M,cc,i}^2} \quad (E.60)$$

où

- $u_{M,i}$ est l'incertitude relative à la méthode appliquée;
- $u_{M,shear,i}$ est l'incertitude relative aux informations de cisaillement manquantes sur l'ensemble du rotor;
- $u_{M,veer,i}$ est l'incertitude relative aux informations de déviation de la trajectoire du vent manquantes sur l'ensemble du rotor;
- $u_{M,upflow,i}$ est l'incertitude relative aux informations d'écoulement ascendant manquantes sur l'ensemble du rotor;
- $u_{M,ti,i}$ est l'incertitude relative aux informations de turbulences manquantes lorsqu'aucun signal de vitesse du vent du mât météorologique à la hauteur du moyeu n'est disponible;
- $u_{M,sfx,i}$ est l'incertitude relative aux variations saisonnières non quantifiables sur l'éolienne;
- $u_{M,tinorm,i}$ est l'incertitude relative à la normalisation des turbulences;
- $u_{M,cc,i}$ est l'incertitude relative à la mesure dans un climat froid.

E.13.16 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la direction du vent par une girouette ou un anémomètre à ultrasons $u_{WV,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à la mesure de la direction du vent par une girouette ou un anémomètre à ultrasons, $u_{WV,i}$:

$$u_{WV,i} = \sqrt{u_{WV,cal,i}^2 + u_{WV,nm,i}^2 + u_{WV,bo,i}^2 + u_{WV,oe,i}^2 + u_{WV,mda,i}^2 + u_{dWV,i}^2} \quad (E.61)$$

où

- $u_{WV,i}$ est l'incertitude relative à la direction du vent mesurée par un capteur de direction du vent monté sur un mât (girouette ou anémomètre à ultrasons);
- $u_{WV,cal,i}$ est l'incertitude relative à l'étalonnage du capteur de direction du vent;
- $u_{WV,nm,i}$ est l'incertitude relative à l'indicateur du nord du capteur de direction du vent;
- $u_{WV,bo,i}$ est l'incertitude relative à l'orientation de la flèche sur laquelle le capteur de direction du vent est monté;
- $u_{WV,oe,i}$ est l'incertitude relative à l'influence du mât météorologique sur la mesure de la direction du vent;
- $u_{WV,mda,i}$ est l'incertitude relative à l'angle de déclinaison magnétique;
- $u_{dWV,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de direction du vent.

E.13.17 Composition des incertitudes relatives à la mesure de la direction du vent par un RSD $u_{WR,i}$

Les composantes d'incertitude suivantes sont composées pour calculer l'incertitude de catégorie B relative à la mesure de la direction du vent par un RSD, $u_{WR,i}$:

$$u_{WR,i} = \sqrt{u_{WR,ver,i}^2 + u_{WR,class,i}^2 + u_{WR,mon,i}^2 + u_{WR,fv,i}^2 + u_{WR,align,i}^2 + u_{WR,mda,i}^2 + u_{dWR,i}^2} \quad (E.62)$$

où

- $u_{WR,i}$ est l'incertitude relative à la direction du vent mesurée par un RSD;
- $u_{WR,ver,i}$ est l'incertitude relative à l'essai de vérification du RSD;
- $u_{WR,class,i}$ est l'incertitude relative à la classification du RSD;
- $u_{WR,mon,i}$ est l'incertitude relative à la surveillance du RSD;
- $u_{WR,fv,i}$ est l'incertitude relative à la variation de l'écoulement du vent sur le volume mesuré;
- $u_{WR,align,i}$ est l'incertitude relative à l'alignement du RSD;
- $u_{WR,mda,i}$ est l'incertitude relative à l'angle de déclinaison magnétique;
- $u_{dWR,i}$ est l'incertitude relative à l'acquisition de données du signal du capteur de direction du vent.

E.13.18 Incertitudes de catégorie B composées

Les incertitudes de catégorie B dans chaque tranche sont composées comme suit:

$$u_i = \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{v,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2} \quad (E.63)$$

E.13.19 Incertitude-type composée – Courbe de puissance

Les incertitudes-types composées de chaque tranche de la courbe de puissance sont trouvées en composant l'incertitude de catégorie A avec toutes les incertitudes de catégorie B.

$$u_{c,i} = \sqrt{S_i^2 + u_i^2} = \sqrt{S_i^2 + u_{P,i}^2 + c_{v,i}^2 u_{v,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2} \quad (\text{E.64})$$

E.13.20 Incertitude-type composée – Production d'énergie

L'incertitude-type composée de l'*AEP* est trouvée en combinant individuellement les incertitudes des catégories A et B en fonction des tranches. Cela peut être fait conformément à la formulation complète de l'Equation (E.4), comme indiqué par l'Equation (E.65), ou à la formulation simplifiée et prudente de l'Equation (E.5), comme indiqué par l'Equation (E.65):

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B} (\sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i})^2} \quad (\text{E.65})$$

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2} \quad (\text{E.66})$$

où

f_i est l'occurrence relative de la vitesse du vent entre V_{i-1} et V_i : $F(V_i) - F(V_{i-1})$ dans la tranche i .

E.14 Pertinence des composantes d'incertitude dans les conditions spécifiées

Conformément au Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, dans certains cas, une composante d'incertitude peut être évaluée et se révéler non significative, et donc ne pas être incluse dans l'évaluation de l'incertitude du résultat de la mesure.

Dans la présente norme, il convient de n'assigner à différentes composantes d'incertitude une valeur égale à zéro que dans ces cas spécifiques ou lorsqu'un ensemble spécifique de conditions a été satisfait. Un exemple est l'incertitude de $u_{VT, \text{coc}, i, j}$, liée à l'incertitude appliquée dans un étalonnage de site lorsque les tranches de direction du vent présentant une variation du facteur de correction supérieure à 2 % par rapport aux tranches adjacentes ne sont pas éliminées de l'ensemble de données (voir C.7.3 d)). Lorsqu'il a été décidé de ne pas éliminer ces tranches, et dans ce cas seulement, $u_{VT, \text{coc}, i, j}$ se voit attribuer une valeur, sinon il prend la valeur zéro.

Il revient à l'utilisateur de la présente norme de déterminer dans quels cas une composante d'incertitude peut être jugée inadéquate et donc être mise à zéro. Il convient de documenter ce fait (y compris la justification) afin de garantir la reproductibilité du calcul de l'incertitude.

E.15 Tableaux de référence

Tableau E.9 – Incertitudes liées à la normalisation de la masse volumique de l'air

N° de tranche	Vitesse du vent normalisée en fonction de la masse volumique de l'air	Vitesse du vent avant normalisation (non normalisée)	Différence entre les vitesses du vent normalisée et non normalisée	Incertitude due à la normalisation de la masse volumique de l'air
i	V_{ni} m/s	$V_{un i}$ m/s	$V_{ni} - V_{un i}$ m/s	$u_{PI,i}$ m/s
4	2,03	2,025	0,008	0,004
5	2,51	2,501	0,013	0,007
6	3,03	3,015	0,014	0,007
7	3,52	3,501	0,016	0,008
8	4,02	4,000	0,022	0,011
9	4,53	4,503	0,028	0,014
10	5,00	4,976	0,029	0,014
11	5,55	5,523	0,031	0,016
12	6,03	5,991	0,035	0,017
13	6,56	6,503	0,055	0,028
14	7,01	6,970	0,041	0,021
15	7,55	7,485	0,061	0,031
16	8,04	7,979	0,065	0,032
17	8,57	8,503	0,064	0,032
18	9,08	8,999	0,080	0,040
19	9,58	9,494	0,090	0,045
20	10,10	10,007	0,091	0,045
21	10,61	10,501	0,113	0,056
22	11,10	10,982	0,122	0,061
23	11,60	11,475	0,121	0,060
24	12,11	11,986	0,125	0,062
25	12,64	12,504	0,139	0,070
26	13,17	13,034	0,134	0,067
27	13,59	13,467	0,123	0,061
28	14,18	14,020	0,157	0,079
29	14,62	14,479	0,140	0,070
30	15,07	14,916	0,149	0,075
31	15,76	15,611	0,151	0,075
32	16,09	15,941	0,147	0,073
33	16,83	16,680	0,150	0,075
34	17,03	16,926	0,100	0,050
35	17,81	17,586	0,226	0,113
36	18,19	18,05 2	0,135	0,068
37	18,5	0,152 2	0,135	0,068
38	19	0,152 1	0,135	0,068
39	19,5	0,153 9	0,135	0,068
40	20	0,154 1	0,135	0,068

N° de tranche	Vitesse du vent normalisée en fonction de la masse volumique de l'air	Vitesse du vent avant normalisation (non normalisée)	Différence entre les vitesses du vent normalisée et non normalisée	Incertitude due à la normalisation de la masse volumique de l'air
i	V_{ni} m/s	V_{uni} m/s	$V_{ni} - V_{uni}$ m/s	$u_{PI,i}$ m/s
41	20,5	0,150 5	0,135	0,068
42	21	0,151 2	0,135	0,068
43	21,5	0,154 8	0,135	0,068
44	22	0,153	0,135	0,068
45	22,5	0,153 3	0,135	0,068
46	23	0,155 7	0,135	0,068
47	23,5	0,156 7	0,135	0,068

Tableau E.10 – Facteurs de sensibilité

	Courbe de puissance (base de données B)		Facteurs de sensibilité		
N° de tranche <i>i</i>	Vitesse du vent V_i m/s	Puissance électrique P_i kW	Vitesse du vent $c_{V,i}$ kW/m/s	Température de l'air $c_{T,i}$ kW/K	Pression atmosphérique $c_{B,i}$ kW/hPa
4	2,13	–3,64	1,712	0,013	0,004
5	2,49	– 3,65	0,014	0,013	0,004
6	2,99	–3,78	0,269	0,013	0,004
7	3,51	– 2,19	3,062	0,008	0,002
8	3,99	– 0,43	3,645	0,001	0,000
9	4,50	6,04	12,825	0,021	0,006
10	4,98	27,70	44,664	0,096	0,027
11	5,52	67,39	74,049	0,234	0,067
12	5,98	111,30	94,430	0,386	0,110
13	6,51	160,95	95,019	0,558	0,159
14	7,01	209,42	95,472	0,727	0,207
15	7,50	261,96	107,566	0,909	0,259
16	8,00	327,63	131,992	1,137	0,323
17	8,50	395,23	136,290	1,372	0,390
18	8,99	462,01	134,677	1,603	0,456
19	9,49	556,06	187,824	1,930	0,549
20	10,00	629,80	145,079	2,186	0,622
21	10,47	703,06	155,957	2,440	0,694
22	11,00	786,55	157,358	2,729	0,776
23	11,50	836,48	100,000	2,903	0,826
24	11,99	893,52	116,327	3,101	0,882
25	12,49	928,61	70,200	3,223	0,917
26	13,03	956,44	51,481	3,319	0,944
27	13,50	971,30	31,702	3,371	0,959
28	14,00	980,92	19,200	3,404	0,968
29	14,48	988,17	15,208	3,429	0,976
30	15,00	993,46	10,192	3,448	0,981
31	15,49	993,71	0,408	3,449	0,981
32	15,99	995,70	4,000	3,455	0,983
33	16,54	996,22	0,909	3,457	0,983
34	17,02	996,42	0,417	3,458	0,984
35	17,48	996,48	0,217	3,458	0,984
36	17,95	996,50	0,000	3,458	0,984
37	18,49	995,71	0,556	3,457	0,983
38	18,97	996,6	0,833	3,459	0,984
39	19,42	996,1	1,111	3,457	0,983
40	19,96	994,1	3,704	3,450	0,981
41	20,51	987,4	12,182	3,427	0,975
42	20,88	996,9	25,676	3,460	0,984

Tableau E.11 – Incertitudes de catégorie B

N° de tranche <i>i</i>	Puissance électrique $u_{P,i}$ kW	Vitesse du vent $u_{V,i}$ m/s	Vitesse du vent $c_{V,i} \cdot u_{V,i}$ kW	Température de l'air $u_{T,i}$ K	Température de l'air $c_{T,i} \cdot u_{T,i}$ kW	Pression atmosphérique $u_{B,i}$ hPa	Pression atmosphérique $c_{B,i} \cdot u_{B,i}$ kW
4	6,29	0,19	0,33	2,09	0,03	3,18	0,01
5	6,29	0,19	0,00	2,09	0,03	3,18	0,01
6	6,29	0,19	0,05	2,09	0,03	3,18	0,01
7	6,29	0,19	0,60	2,09	0,02	3,18	0,01
8	6,29	0,20	0,71	2,09	0,00	3,18	0,00
9	6,29	0,20	2,53	2,09	0,04	3,18	0,02
10	6,29	0,20	8,85	2,09	0,20	3,18	0,09
11	6,30	0,20	14,82	2,09	0,49	3,18	0,21
12	6,32	0,20	19,04	2,09	0,81	3,18	0,35
13	6,35	0,20	19,34	2,09	1,17	3,18	0,51
14	6,39	0,21	19,58	2,09	1,52	3,18	0,66
15	6,44	0,21	22,28	2,09	1,90	3,18	0,82
16	6,52	0,21	27,66	2,09	2,37	3,18	1,03
17	6,62	0,21	28,87	2,09	2,86	3,18	1,24
18	6,74	0,21	28,86	2,09	3,35	3,18	1,45
19	6,93	0,22	40,71	2,09	4,03	3,18	1,75
20	7,09	0,22	31,82	2,09	4,57	3,18	1,98
21	7,28	0,22	34,61	2,09	5,10	3,18	2,21
22	7,51	0,22	35,38	2,09	5,70	3,18	2,47
23	7,65	0,23	22,77	2,09	6,06	3,18	2,63
24	7,82	0,23	26,81	2,09	6,48	3,18	2,81
25	7,93	0,23	16,41	2,09	6,73	3,18	2,92
26	8,02	0,24	12,20	2,09	6,93	3,18	3,00
27	8,07	0,24	7,61	2,09	7,04	3,18	3,05
28	8,10	0,24	4,67	2,09	7,11	3,18	3,08
29	8,13	0,25	3,75	2,09	7,16	3,18	3,10
30	8,14	0,25	2,55	2,09	7,20	3,18	3,12
31	8,14	0,25	0,10	2,09	7,20	3,18	3,12
32	8,15	0,26	1,03	2,09	7,22	3,18	3,13
33	8,15	0,26	0,24	2,09	7,22	3,18	3,13
34	8,15	0,26	0,11	2,09	7,22	3,18	3,13
35	8,15	0,27	0,06	2,09	7,22	3,18	3,13
36	8,15	0,27	0,00	2,09	7,22	3,18	3,13
37	8,15	0,28	0,15	2,09	7,22	3,18	3,13
38	8,15	0,28	0,23	2,09	7,22	3,18	3,13
39	8,15	0,28	0,32	2,09	7,22	3,18	3,13
40	8,15	0,29	1,07	2,09	7,21	3,18	3,12
41	8,12	0,29	3,54	2,09	7,16	3,18	3,10
42	8,15	0,29	7,54	2,09	7,23	3,18	3,13

Annexe F (normative)

Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les anémomètres

F.1 Exigences générales

Les exigences générales pour l'étalonnage des anémomètres sont résumées de la manière suivante:

- a) l'étalonnage de l'anémomètre doit être réalisé dans une soufflerie qui est adaptée à l'étalonnage des anémomètres;
- b) l'installation d'étalonnage doit être reconnue par l'IECRE et accréditée conformément à l'ISO/IEC 17025, qui est la norme principale pour les laboratoires d'étalonnages et d'essais;
- c) tous les transducteurs et le matériel de mesure adaptés à l'étalonnage des anémomètres doivent présenter des étalonnages traçables, conformément à l'ISO/IEC 17025. Les certificats et rapports d'étalonnage doivent contenir toutes les informations pertinentes relatives à la traçabilité;
- d) la vitesse du vent de référence doit être mesurée au moyen d'un tube de Pitot double qui doit être de type NPL à tête ellipsoïdale, conformément à l'ISO 3966. Le tube de Pitot double doit être étalonné pour les plages de vitesses du vent appropriées et doit être documenté. En variante, la vitesse du vent de référence peut être mesurée par anémométrie laser Doppler (LDA, *Laser Doppler Anemometry*) avec des incertitudes bien documentées;
- e) la cohérence du montage expérimental doit être vérifiée au minimum par des étalonnages comparatifs quotidiens de l'"anémomètre de commande de qualité" de l'installation;
- f) la qualité de l'écoulement doit être vérifiée comme exigé à l'Article F.2;
- g) la répétabilité de l'étalonnage doit être vérifiée, comme exigé à l'Article F.2;
- h) l'étalonnage de l'anémomètre doit être s'appuyer sur une évaluation exhaustive de l'incertitude d'étalonnage, réalisée conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3:2008.

F.2 Exigences pour la soufflerie

La présence de l'anémomètre ne doit pas affecter de manière considérable le champ d'écoulement dans la soufflerie. Au cours des mesures, et jusqu'à un certain point, l'anémomètre sera influencé par l'obstruction de la soufflerie et les effets de bord. Le rapport d'obstruction de surface (*BR*, *Blockage area Ratio*) ne doit pas dépasser 0,05. Il est défini comme le rapport de la surface projetée par l'anémomètre, perpendiculaire à la direction de l'écoulement (y compris son système de montage et la surface projetée par un rotor tournant), à la surface totale de la section d'essai. Les effets d'obstruction doivent toujours être pris en compte conformément à F.4.3.

Il est recommandé que la section d'essai de la soufflerie présente une hauteur d'au moins 1,0 m et une largeur d'au moins 1,0 m.

L'écoulement doit être uniforme dans la surface de la section, où sera monté l'anémomètre. Il convient de mesurer l'uniformité de l'écoulement avec les dispositifs de détection de la vitesse, c'est-à-dire les tubes de Pitot, les anémomètres à fils chauds ou la vélocimétrie laser Doppler, afin de mesurer les profils d'écoulement dans les directions longitudinale, transversale et verticale. Sur la plage de vitesses du vent d'étalonnage, la différence maximale de la vitesse moyenne entre deux points quelconques à l'intérieur du volume de mesure doit être inférieure à 0,2 %. La valeur moyenne doit être calculée sur au moins 5 minutes et le volume de mesure doit couvrir le volume actif de l'anémomètre, avec une marge de 50 % dans toutes les directions conformément à la Figure F.1. L'uniformité doit être

soumise à l'essai sur une période minimale de 5 min pour les vitesses du vent environ égales à 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s chacune.

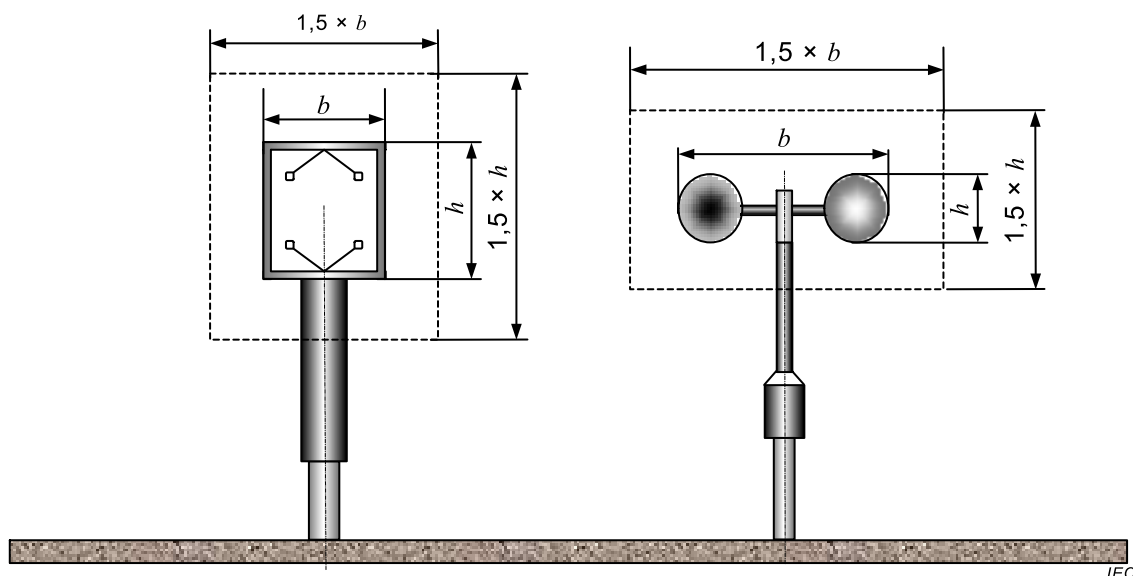


Figure F.1 – Définition du volume pour l'essai d'uniformité d'écoulement – Le volume présentera également une profondeur de $1,5 \times b$ (le long de l'écoulement)

La stabilité de l'écoulement doit être mesurée au centre du volume pour lequel l'uniformité a été vérifiée. L'écoulement peut être considéré comme stable si 10 moyennes de 30 s consécutives sont comprises dans les 0,5 % de sa valeur moyenne.

Les anémomètres à coupelles sont très sensibles aux gradients horizontaux de vent. Différents gradients horizontaux de vent peuvent être observés en fonction de la pollution des filets et des dispositifs de lissage. Par conséquent, il est utile de vérifier le gradient horizontal de vent en utilisant deux tubes de Pitot identiques. Ils doivent être placés à la position exacte à laquelle l'anémomètre sera lui-même placé, leurs têtes balayant de façon approximative la surface couverte par les coupelles des anémomètres à coupelles rotatives. Un ensemble de mesures doit être réalisé, et la régression linéaire doit être calculée entre les pressions dynamiques mesurées par les deux tubes de Pitot. La différence de vitesse du vent doit être inférieure à 0,2 % sur une période minimale de 5 min. Il doit être vérifié que l'influence de la présence du type d'anémomètre à étalonner (notamment le tube de montage) sur la vitesse de l'écoulement mesurée par le tube de Pitot est inférieure à $\pm 0,2$ %.

L'intensité des turbulences axiales dans la vitesse du vent à l'emplacement de l'anémomètre doit être inférieure à 2 %. L'intensité des turbulences doit inclure les fluctuations de la vitesse du vent longitudinale avec des fréquences allant jusqu'à 10 Hz. Les données relatives aux mesures des turbulences doivent être obtenues pour une durée de 60 s par vitesse du vent à une fréquence d'échantillonnage minimale de 20 Hz. L'évaluation des turbulences doit être réalisée au minimum pour les vitesses d'écoulement de 7 m/s, 10 m/s et 13 m/s avec un dispositif adapté à la mesure des fluctuations de la vitesse du vent dont la fréquence de coupure minimale est de 20 Hz. Les écarts par rapport aux exigences susmentionnées doivent être évalués par des essais appropriés et être examinés lors de l'évaluation de l'incertitude.

Le facteur d'étalonnage de la soufflerie, qui donne la relation entre les conditions à l'emplacement de la mesure de référence et les conditions à l'emplacement de l'anémomètre, doit être estimé à l'aide des tubes de Pitot pour une plage de vitesses allant de 4 m/s à 16 m/s.

Le montage d'étalonnage doit être soumis à un examen approfondi de la répétabilité des étalonnages des anémomètres. L'installation d'étalonnage doit désigner des anémomètres de

référence de tailles représentatives destinés à être utilisés au cours de ces essais. Il convient que l'écart-type et l'écart maximal de la sortie de l'anémomètre de commande de qualité dans la plage de vitesses d'étalonnage soient respectivement inférieurs à 0,2 % et 0,6 % de leur valeur moyenne.

L'installation doit prouver que ses résultats sont comparables aux autres installations d'étalonnage d'anémomètres en réalisant des essais d'aptitude, conformément à l'ISO 17043.

F.3 Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage

Le matériel dédié de conditionnement du signal externe (notamment les convertisseurs fréquence-tension, entre autres) doit être étalonné séparément de l'anémomètre, permettant ainsi de déduire et de consigner les étalonnages de l'anémomètre et dudit matériel de manière séparée.

La résolution du système d'acquisition de données doit être au minimum de 0,02 m/s. Une attention particulière doit également être prêtée en cas d'instrument de mesure de la tension analogue visant à garantir que le signal est correctement mis en tampon afin d'empêcher son atténuation par un matériel d'enregistrement de faible impédance.

Les configurations de montage peuvent avoir des effets considérables sur la performance de l'instrument, plus particulièrement si le rapport du diamètre du tube au diamètre du rotor est élevé. Par conséquent, au cours de l'étalonnage, l'anémomètre doit être monté au sommet d'un tube afin de réduire le plus possible la distorsion de l'écoulement et un seul anémomètre peut être étalonné à la fois. Ce tube doit présenter le même diamètre que celui sur lequel l'anémomètre sera monté pour son fonctionnement dans l'atmosphère libre. A titre de recommandation, il convient que la distance verticale entre le rotor de l'anémomètre et les limites inférieure et supérieure de la section d'essai de la soufflerie soit au moins égale à 0,5 m. Si l'anémomètre est sensible à la direction de l'écoulement horizontal, une orientation de référence doit être définie, documentée et utilisée au cours de l'étalonnage. L'anémomètre doit être positionné au niveau de la section d'essai, perpendiculaire au champ d'écoulement de la soufflerie, de manière aussi précise que possible. L'écart maximal du tube de montage de l'anémomètre est de 0,2°. Un exemple de réponse d'inclinaison d'un anémomètre à coupelles type est donné à la Figure J.1.

Il est important de garantir que l'anémomètre n'est pas influencé par la présence d'un matériel de mesure de la vitesse du vent de référence. Réciproquement, la présence d'un anémomètre ne doit pas affecter l'écoulement dans la zone de l'instrument de référence. En cas d'effets de distorsion de l'écoulement, le tube de Pitot doit être remplacé. Ces effets peuvent être évalués en enlevant puis en réinstallant l'anémomètre puis l'instrument de référence, et enfin en vérifiant si la sortie de l'instrument restant varie ou non.

Les tubes de Pitot doubles doivent être placés dans la section d'essai en alignement avec la direction moyenne de l'écoulement. Le désalignement maximal admis est 0,5°.²⁷

Au cours de l'étalonnage, le signal de sortie de l'anémomètre doit être examiné pour garantir qu'il n'est pas soumis à des interférences ou nuisances sonores.

²⁷ Un désalignement des tubes de Pitot doubles peut mener à une polarisation lors de la mesure de la pression différentielle. Un alignement compris dans les 0,5° de la direction moyenne de l'écoulement assure une polarisation de la valeur de pression différentielle de moins de 0,1 % pour le tube de Pitot de type NPL (voir l'ISO 3966:2008, Figure A.5).

F.4 Procédure d'étalonnage

F.4.1 Procédure générale pour les anémomètres à coupelles et à ultrasons

L'anémomètre doit fonctionner pendant au moins 5 min à une vitesse d'environ 10 m/s avant d'amorcer la procédure d'étalonnage. L'étalonnage doit être réalisé à des vitesses du vent à la fois croissantes et décroissantes, dans la plage de 4 m/s à 16 m/s, à un intervalle d'étalonnage de 1 m/s ou moins²⁸. Si le chauffage est activé pendant les étalonnages, cela doit être noté dans le certificat d'étalonnage.

La fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins 1 Hz et l'intervalle d'échantillonnage d'au moins 30 s. Cet intervalle d'échantillonnage peut être augmenté lorsque des anémomètres basse résolution sont étalonnés. Il est important de garantir que les indications de la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre et les indications de la vitesse du vent de référence couvrent la même période. Avant de recueillir les données à chaque vitesse du vent, une durée adéquate doit être admise puis établie pour des conditions d'écoulement stables (voir Article F.2). Elle peut être de 1 min, mais variera selon les installations.

F.4.2 Procédure d'étalonnage des anémomètres à ultrasons

Les anémomètres à ultrasons sont conçus pour mesurer les composantes du vent 2D ou 3D. Pour les besoins des mesures de la performance de puissance, les anémomètres à ultrasons doivent être configurés pour mesurer la vitesse horizontale du vent, de préférence en interne ou par post-traitement.

Au cours de l'étalonnage, la totalité de l'anémomètre à ultrasons doit être placée dans la section d'essai de la soufflerie. La partie active de l'anémomètre à ultrasons doit être située dans le volume de la section d'essai. L'alignement d'orientation doit être établi sur la direction d'orientation d'étalonnage de référence, voir Article F.3. Il est souvent avantageux d'établir un alignement d'orientation qui impose la plus faible perturbation de l'écoulement engendrée par les supports des émetteurs acoustiques.

Pendant l'étalonnage de l'anémomètre à ultrasons, ses paramètres de montage doivent être documentés dans le certificat d'étalonnage ou dans l'une de ses annexes. L'étalonnage couvre uniquement les réglages identiques du capteur et un format identique de signal de sortie.

Pour cet essai, l'anémomètre à ultrasons doit être étalonné à des vitesses du vent variables, conformément au Paragraphe F.4.1. Les étalonnages de l'emplacement d'orientation supplémentaire (c'est-à-dire l'angle d'orientation pour la perturbation de l'écoulement maximale engendrée par les supports) peuvent être réalisés, si cela est souhaité. Il convient de réaliser les étalonnages des emplacements d'orientation supplémentaires à 10 m/s sous forme d'un contrôle qualité de la conformité aux résultats de la classification.

Le signal d'état de l'anémomètre à ultrasons (s'il est disponible) doit être surveillé au cours des étalonnages. Le signal d'état doit être utilisé pour exclure les données erronées.

F.4.3 Détermination de la vitesse du vent à l'emplacement de l'anémomètre

La masse volumique de l'air ρ doit être calculée sur la base de la température de l'air de la soufflerie T , l'humidité relative Φ et la pression atmosphérique B moyennes, en utilisant l'Equation (F.1) (incertitude-type inférieure à 10^{-3} kg/m³):

²⁸ Des intervalles de 1 m/s peuvent également être appliqués avec des écarts de valeurs de 2 m/s, par exemple 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s, 15 m/s, 13 m/s, 11 m/s, 9 m/s, 7 m/s, 5 m/s.

$$\rho = \frac{1}{T} \left(\frac{B}{R_0} - \phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (\text{F.1})$$

où

B est la pression atmosphérique [Pa];

T est la température absolue [K];

ϕ est l'humidité relative (plage de 0 à 1);

R_0 est la constante de gaz de l'air sec [287,05 J/kgK];

R_w est la constante de gaz de la vapeur d'eau (461,5) [J/kgK];

P_w est la pression de vapeur [Pa].

La pression de vapeur P_w dépend de la température moyenne de l'air.

$$P_w = 0,0000205 \cdot \exp(0,0631846 \cdot T) \quad (\text{F.2})$$

La vitesse moyenne de l'écoulement à l'emplacement de l'anémomètre est calculée à partir de la pression différentielle moyenne

Δp_{ref} à l'emplacement de référence en utilisant l'équation:

$$\bar{v} = f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots) a k_c \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\text{ref},i}}{\rho}} \quad (\text{F.3})$$

où

α est le coefficient de la tête du tube de Pitot double;

k_c est le facteur d'étalonnage de la soufflerie, qui donne la relation entre les conditions à l'emplacement de la mesure de référence et les conditions à l'emplacement de l'anémomètre;

$f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ est une fonction de correction due à l'interférence entre l'anémomètre, y compris son tube de montage, et l'écoulement de la soufflerie;

k_b est le facteur de correction de l'interférence dû à l'obstruction;

k_i est le facteur de correction dû à l'interférence entre l'anémomètre (y compris son tube de montage) et l'enveloppe de la section d'essai, comprenant également les effets de l'écoulement provoqués par les tubes de montage s'étendant jusqu'à l'enveloppe;

k_p est le facteur de correction dû à l'interférence provoquée par l'anémomètre (y compris son tube de montage) sur la vitesse mesurée par le tube de Pitot;

$\bar{v}$ est la vitesse moyenne du vent à l'emplacement de l'anémomètre;

$\bar{v}_p$ est la vitesse moyenne du vent à l'emplacement de référence;

n est le nombre d'échantillons dans un intervalle d'échantillonnage.

Il convient que la fonction de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ soit égale à 1 pour une section d'essai sans anémomètre et son tube de support. L'influence de la fonction de correction sur les résultats de l'étalonnage doit être évaluée et incluse dans le rapport de montage de l'installation d'étalonnage et le calcul d'incertitude.

F.5 Analyse des données

Une analyse par régression linéaire doit être réalisée sur les données d'étalonnage pour estimer les paramètres de régression suivants: décalage, pente, coefficient de régression et incertitude-type. Les valeurs de vitesse du vent doivent subir une régression par rapport aux sorties de l'anémomètre.

Si le coefficient de corrélation r pour les données est inférieur à 0,999 95, il doit être vérifié s'il est provoqué par la non-linéarité de l'anémomètre ou par d'autres paramètres. Si l'anémomètre présente une non-linéarité, celle-ci doit être documentée dans le certificat.

F.6 Analyse d'incertitude

Il est important d'identifier l'incertitude de la vitesse horizontale du vent incidente sur l'anémomètre. Une analyse d'incertitude doit être réalisée conformément à l'ISO/IEC Guide 98:2008 et regrouper les deux catégories d'incertitudes A et B. L'amplitude de l'incertitude nette doit être évaluée d'un point de vue statistique et doit prendre en compte les éléments suivants:

- a) incertitude de mesure de la vitesse de l'écoulement (tubes de Pitot, transducteurs, évaluation de la masse volumique de l'air, etc.);
- b) facteur d'étalonnage de la soufflerie;
- c) facteurs de correction de la soufflerie de la fonction de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ définis dans l'Equation (F.3);
- d) l'influence de la taille de la section de la soufflerie doit être évaluée dans le cadre de l'analyse d'incertitude;
- e) mesures de la sortie de l'anémomètre;
- f) l'influence de l'alignement de l'anémomètre non vertical doit être étudiée pour chaque type d'anémomètre au cours de l'évaluation d'incertitude;
- g) incertitude statistique due à une dispersion à court terme de la sortie de l'anémomètre (variation du signal de l'anémomètre indiqué, c'est-à-dire fluctuation de la vitesse angulaire du rotor, polarisation issue de la génération du signal, polarisation de l'échantillonnage sur le temps de moyennage);
- h) incertitude due à la différence entre le résultat de la soufflerie où sera réalisé l'étalonnage et le résultat moyen d'autres souffleries déterminé par les essais d'aptitude, hors différence couverte par d'autres composantes d'incertitude;
- i) incertitude due à la linéarisation de l'expression de l'étalonnage.

F.7 Format de rapport

La documentation appropriée doit fournir les informations relatives à la procédure suivie, l'installation utilisée pour l'étalonnage des anémomètres (rapport de montage de l'installation d'étalonnage) et l'étalonnage de chaque anémomètre. Le rapport de montage de l'installation d'étalonnage doit, au minimum, inclure les informations suivantes:

- a) description de la soufflerie (y compris section d'essai, chambre de dépôt, redresseurs d'écoulement, disposition des ventilateurs);
- b) croquis de la soufflerie présentant les emplacements des anémomètres et du ou des tubes de Pitot dans la section d'essai;
- c) mesures de la qualité de l'écoulement;
- d) évaluation de l'effet d'obstruction;
- e) influence de la hauteur de montage de l'anémomètre;
- f) influence de la plaque de fond;

- g) influence de l'emplacement de montage sur la mesure de référence;
- h) influence de la fonction de correction;
- i) mesures des turbulences;
- j) certificats d'instrumentation;
- k) procédure de mesure;
- l) procédure d'évaluation des données;
- m) documentation de répétabilité de l'étalonnage de l'anémomètre;
- n) analyse d'incertitude;
- o) écarts par rapport à ces exigences.

Le rapport d'étalonnage d'un anémomètre doit, au minimum, inclure les informations suivantes:

- 1) marque, type et numéro de série de l'anémomètre à l'essai et numéro de série de la coupelle si elle est transportée séparément;
- 2) spécification de l'orientation au cours de l'étalonnage (dispositifs sensibles à l'orientation);
- 3) diamètre du tube du système de montage;
- 4) marque, type et numéro de série des convertisseurs externes;
- 5) nom et adresse du client;
- 6) signatures des personnes qui ont réalisé l'étalonnage, vérifié les résultats et approuvé leur publication;
- 7) nom de la soufflerie;
- 8) conditions environnementales au cours de l'étalonnage (température de l'air, pression atmosphérique et humidité);
- 9) paramètres de régression (décalage, pente, coefficient de régression);
- 10) incertitude due à la linéarisation (dispersion des résidus);
- 11) incertitude due à la fonction de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$;
- 12) présentation sous forme de tableaux et graphiques (écarts par rapport à la ligne de régression linéaire amplifiés) de tous les points d'étalonnage et des résultats de régression;
- 13) incertitude associée à chaque point de mesure;
- 14) référence au rapport de montage de l'installation d'étalonnage correspondant;
- 15) date de l'étalonnage;
- 16) photo de l'anémomètre et du montage dans la soufflerie.

F.8 Exemple de calcul d'incertitude

Dans la mesure où la vitesse de l'écoulement ne peut pratiquement pas être mesurée à l'emplacement de l'anémomètre et où le champ d'écoulement du capteur est considérablement plus faible dans la soufflerie que dans l'atmosphère libre, des corrections sont nécessaires. L'optimisation de la soufflerie tant en termes de corrections que de détermination du facteur de correction est essentielle pour le calcul de l'incertitude de mesure.

Idéalement, il convient d'appliquer séparément le calcul d'incertitude à chaque condition d'étalonnage de la vitesse du vent utilisée dans un essai d'étalonnage. Cet exemple présente un point d'étalonnage théorique de 10 m/s utilisant une soufflerie dont la valeur assignée est 25 m/s.

Le Tableau F.1 couvre chaque source d'incertitude, en commençant par celles de la catégorie B.

Pour éviter les répétitions, une évaluation approfondie de la mesure de la pression atmosphérique a été omise, dans le sens où elle peut être traitée de la même manière que la mesure de la température.

Tableau F.1 – Exemple d'évaluation de l'incertitude d'étalonnage d'un anémomètre

Source d'erreur u_i	Explication	Valeur u_i	Valeur de sensibilité c_i	$u_i c_i$ m/s
u_f , facteur de correction de la soufflerie, f	Une incertitude sur le facteur de correction $f(k_b, k_i, k_p, \bar{v}_p, \dots)$ basée sur l'examen des facteurs d'influence de l'étalonnage.			
u_i , facteur d'étalonnage de la soufflerie, k_c	L'étalonnage de la soufflerie peut être réalisé en utilisant deux tubes de Pitot, l'un situé à l'emplacement de référence permanent et l'autre à l'emplacement de l'anémomètre à l'essai. En intervertissant les deux systèmes de Pitot, toutes les erreurs de catégorie B peuvent être éliminées et l'analyse par régression normalisée peut être appliquée pour produire un facteur de correction (l'ordonnée à l'origine étant forcée à passer par l'origine) et une incertitude-type relative de catégorie A. Par hypothèse, la valeur de correction est 1,02 et l'incertitude-type est 0,01.	0,01	$C_t = 0,5 v/k_c$ $= 0,5 \times 10/1,02$ $= 4,90 \text{ m/s}$	0,049
u_b , facteur de correction de l'obstruction, k_b	Si un objet solide est placé dans l'écoulement de la soufflerie, l'écoulement sera affecté selon la relation entre la taille de l'objet et la surface de la soufflerie. En fonction des dimensions dans l'espace de l'éprouvette, la vitesse de l'écoulement augmente dans une section de mesure fermée en raison de la continuité. Dans une section de mesure ouverte, le courant sera élargi, entraînant une réduction de la vitesse. En prenant pour hypothèse que l'effet d'obstruction est connu, une valeur d'incertitude de 0,1 % est appropriée. Le rapport de montage de l'installation d'étalonnage doit présenter les calculs appliqués et la valeur estimée du facteur de correction et de l'incertitude associée.	0,001	$C_f = v/k_b$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
u_{k_i} , facteur de correction de l'emplacement, k_i	Un anémomètre nécessite de disposer d'un espace libre donné (en fonction de la taille de la canalisation de montage et de l'anémomètre) en dessous et au-dessus de lui afin de reproduire les mêmes conditions d'écoulement qu'en atmosphère libre. Ainsi, le centre de la section de mesure n'est pas nécessairement le meilleur emplacement pour l'éprouvette. Si la taille de la soufflerie est réduite et si, par conséquent, la canalisation de montage est trop courte, une erreur allant jusqu'à 2 % peut survenir. L'influence commence à diminuer seulement à partir de certaines longueurs de canalisation de montage. Cette longueur libre est égale à 50 cm environ au-dessus de la plaque d'appui. En prenant pour hypothèse que l'effet de l'emplacement est connu, une valeur d'incertitude de 0,1 % peut être appropriée.	0,001	$C_p = v/k_p$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
u_p , facteur de correction de	L'écoulement autour de l'anémomètre exerce une certaine influence sur	0,001		

Source d'erreur u_i	Explication	Valeur u_i	Valeur de sensibilité c_i	$u_i c_i$ m/s
l'emplacement, k_p	l'écoulement autour du tube de Pitot de référence. En prenant pour hypothèse que l'effet de l'influence est connu, une valeur d'incertitude de 0,1 % de l'effet peut être appropriée.			
u_B , facteur de correction de l'écoulement, k_{FD}	Les anémomètres sont souvent montés sur de très hauts mâts de mesure, situation qui ne peut pas être reproduite dans une soufflerie. Si un anémomètre est monté sur une embase de tube, elle-même montée dans une soufflerie avec une section de mesure ouverte, le courant peut s'échapper vers le bas. Cela implique une perte d'impulsion pour l'anémomètre, et donc une erreur systématique. En installant une plaque d'appui, cette perte peut être considérablement réduite. En prenant pour hypothèse qu'une plaque d'appui est installée, une valeur d'incertitude-type de 0,1 % est appropriée. Sinon, l'influence doit être examinée.	0,001	$C_{FD} = v/k_{FD}$ $= 10 \text{ m/s}/1,001$ $\approx 10 \text{ m/s}$	0,01
$u_{p,t}$ transducteur de pression, $K_{p,t}$	Le certificat d'étalonnage du transducteur de pression affiche une incertitude maximale de 0,5 Pa dans la plage allant de 0 Pa à 500 Pa.	0,5 Pa	$c_{p,t} = 0,5 \text{ v}/K_{p,t}$ $= 0,5 \times 10/5\ 000$ $= 0,001$	0,000 5
$u_{p,s}$ gain de conditionnement du signal du transducteur de pression, $K_{p,s}$ et $u_{p,d}$ conversion de l'échantillonnage de données du transducteur de pression $K_{p,d}$	L'étalonnage du matériel de mesure de la sortie du transducteur de pression affiche une incertitude maximale de 0,000 15 V dans la plage allant de 0 V à 10 V.	0,000 15 V	$c_{p,s} = 0,5 \text{ v}/K_{p,s}$ $= 0,5 \times 10/0,01$ $= 500$	0,010
$u_{T,t}$ transducteur de température ambiante, $K_{T,t}$, $u_{p,s}$ gain de conditionnement du signal de température, $K_{p,s}$ et $u_{T,d}$ conversion numérique du signal de température, $K_{T,d}$	L'étalonnage du matériel de mesure de la température affiche une incertitude maximale de 0,1 °C dans la plage allant de 10 °C à 30 °C.	0,1 °C	$c_{T,t} = 0,5 \text{ v}/K_{T,t}$ n/a	0,001
u_h coefficient de la tête du tube de Pitot, C_h	Le coefficient de la tête du tube de Pitot dépend de l'angle d'attaque du vent. Deux sources d'erreur sont possibles: la première est liée à la précision avec laquelle le tube de Pitot est réglé en alignement avec la direction moyenne de l'écoulement et la deuxième est due aux variations des turbulences dans la direction instantanée d'écoulement. Par hypothèse, le coefficient nominal de la tête, C_h , est 0,997 et il peut être déduit que l'écart-type de l'angle d'attaque est égal à 2°. Les normes ISO pertinentes suggèrent que cela donnera lieu à une augmentation de 0,1 % du coefficient de la tête.	0,000 997	$C_h = -0,5 \text{ v}/C_h$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	0,005

Source d'erreur u_i	Explication	Valeur u_i	Valeur de sensibilité c_i	$u_i c_i$ m/s
u_{pcal} étalonnage du tube de Pitot	D'après le certificat d'étalonnage du tube de Pitot, une incertitude de 0,25 % dans la plage allant de 4 m/s à 16 m/s peut être utilisée.	0,002 5	$C_{\text{ph}} = -0,5 \text{ v}/C_{\text{h}}$ $= -0,5 \times 10/0,997$ $= -5,015$	
$u_{\text{B,t}}$ sensibilité du baromètre, $K_{\text{B,t}}$, $u_{\text{B,s}}$ gain de conditionnement du signal du baromètre, $K_{\text{B,s}}$ et $u_{\text{B,d}}$ conversion numérique du signal du baromètre, $K_{\text{B,d}}$	L'étalonnage du baromètre affiche une incertitude maximale de 0,5 hPa dans la plage allant de 900 hPa à 1 100 hPa.	0,5 hPa	$c_{\text{B,t}} = -0,5 \text{ v}/k_{\text{B,t}}$	
s_{A} incertitude statistique de la moyenne du chronogramme de la vitesse du vent	Par hypothèse, l'intensité des turbulences est de 2 %, et un échantillonnage de 2 Hz sur une période de 30 s est utilisé, ce qui donne 60 échantillons. L'incertitude-type de la valeur moyenne de 10 m/s est alors donnée par: $\sqrt{1/60 \cdot 0,02 \cdot 10}$	0,026	1	0,026
u_{p} , correction d'humidité dans la masse volumique, k_{p} ou $u_{\text{φ}}$, humidité relative, $φ$	L'étalonnage du matériel de mesure de l'humidité relative affiche une incertitude de moins de 2 % dans la plage allant de 10 % à 95 %. Une valeur de 2 % est choisie pour le calcul. $c_{\varphi} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial k_{\text{p}}} \cdot \frac{\partial k_{\text{p}}}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \frac{\bar{v}}{k_{\text{p}}} 0,378 \frac{P_{\text{w}}}{B}$ Pour une température de 15 °C, $P_{\text{w}} = 1\,700 \text{ Pa}$ et, en prenant pour hypothèse que $B = 1\,013 \text{ mbar} = 101\,300 \text{ Pa}$, k_{p} est évalué à 0,997 et c_{φ} (à 10 m/s) est égal à 0,032.	$u_{\varphi} = 0,02 \% \text{RH}$	$c_{\text{p}} = 0,032$	0,001

L'incertitude-type composée peut être obtenue en utilisant la valeur efficace des incertitudes de contribution dans la colonne de droite. Pour les valeurs qui ont déjà été traitées, elle correspond à 0,06 m/s.

L'exemple montre que l'erreur de catégorie B est susceptible de prévaloir. L'extension de la période d'étalonnage peut permettre de réduire l'incertitude de catégorie A, mais n'aura aucun effet sur la catégorie B. En outre, les sources d'erreurs de catégorie B, même si elles ne sont pas corrélées entre elles pour une vitesse du vent spécifique, sont complètement autocorrélées pour l'ensemble des vitesses du vent. En d'autres termes, des étalonnages apparents corrects (lignes parfaitement droites) peuvent être obtenus, malgré le maintien d'une incertitude considérable.

Annexe G (normative)

Montage des instruments sur le mât météorologique

G.1 Généralités

Un montage approprié des instruments sur le mât météorologique est important pour assurer la précision de l'essai de l'éolienne. Le montage des anémomètres pour les essais de performance de puissance doit inclure un anémomètre principal à la hauteur du moyeu, ainsi qu'un anémomètre de commande. L'objectif de l'anémomètre de commande consiste à fournir un moyen de vérifier in situ la cohérence des mesures de l'anémomètre principal à la hauteur du moyeu décrit à l'Annexe K. Avant d'utiliser un anémomètre destiné aux essais de performance de puissance, il est recommandé de contrôler sa géométrie d'après la description de la géométrie correspondant à sa catégorie de classification. L'anémomètre doit en particulier être placé de façon à réduire le plus possible les distorsions d'écoulement, en particulier dues à l'influence du mât et de la flèche. Lorsqu'une distorsion de l'écoulement minimale est exigée sur une large plage de directions du vent, elle est obtenue à l'aide d'un anémomètre unique monté en tête de mât. Cependant, un montage côte à côte de deux anémomètres en tête de mât apporte une redondance et une méthode résistante de contrôle de la cohérence des anémomètres n'entraînant qu'une faible augmentation de la distorsion de l'écoulement si une séparation horizontale adéquate et une structure stable de montage des anémomètres sont réunies. Lorsque les anémomètres sont montés sur des flèches latérales à des altitudes inférieures à la tête du mât météorologique, la distorsion de l'écoulement provenant à la fois du mât météorologique et de la flèche est considérable et doit être prise en compte. Indépendamment du type de configuration de montage, des précautions doivent être prises pour garantir que la structure de la flèche est suffisamment stable pour éviter des vibrations significatives. Il convient de placer les autres instruments qui doivent être montés sur le mât météorologique à proximité de la hauteur du moyeu (anémomètre de commande, girouettes, capteurs de température et de pression) de manière à éviter les interférences avec l'anémomètre primaire.

G.2 Un seul anémomètre monté en tête de mât

Pour obtenir une distorsion de l'écoulement négligeable des mesures de vitesses du vent sur une large plage de directions du vent, la configuration idéale est un anémomètre unique monté en tête de mât. Lorsque cette configuration est adoptée, toutes les dispositions de la présente section doivent être satisfaites. Toutefois, il convient d'estimer avec attention si les contrôles de cohérence des anémomètres par rapport à un anémomètre d'altitude inférieure peuvent être suffisamment résistants dans le cadre de cette configuration. Cela est notamment le cas lorsque la surface de section du mât météorologique est large, l'anémomètre le moins élevé étant en effet soumis à des effets d'interférence au niveau du mât météorologique plus considérables que l'anémomètre monté en tête de mât, mais également lorsque de grandes variations du cisaillement du vent sont relevées.

L'anémomètre doit être monté de manière à ce que ses coupelles²⁹ se situent au moins à 1,5 m au-dessus du mât météorologique et des autres sources de perturbation de l'écoulement et qu'aucune partie de la structure de support ou du mât météorologique ne doive s'étendre à l'extérieur d'un demi-cône 11:1³⁰ dont le vertex coïncide avec les coupelles de l'anémomètre. L'anémomètre doit être monté sur un tube vertical cylindrique de même

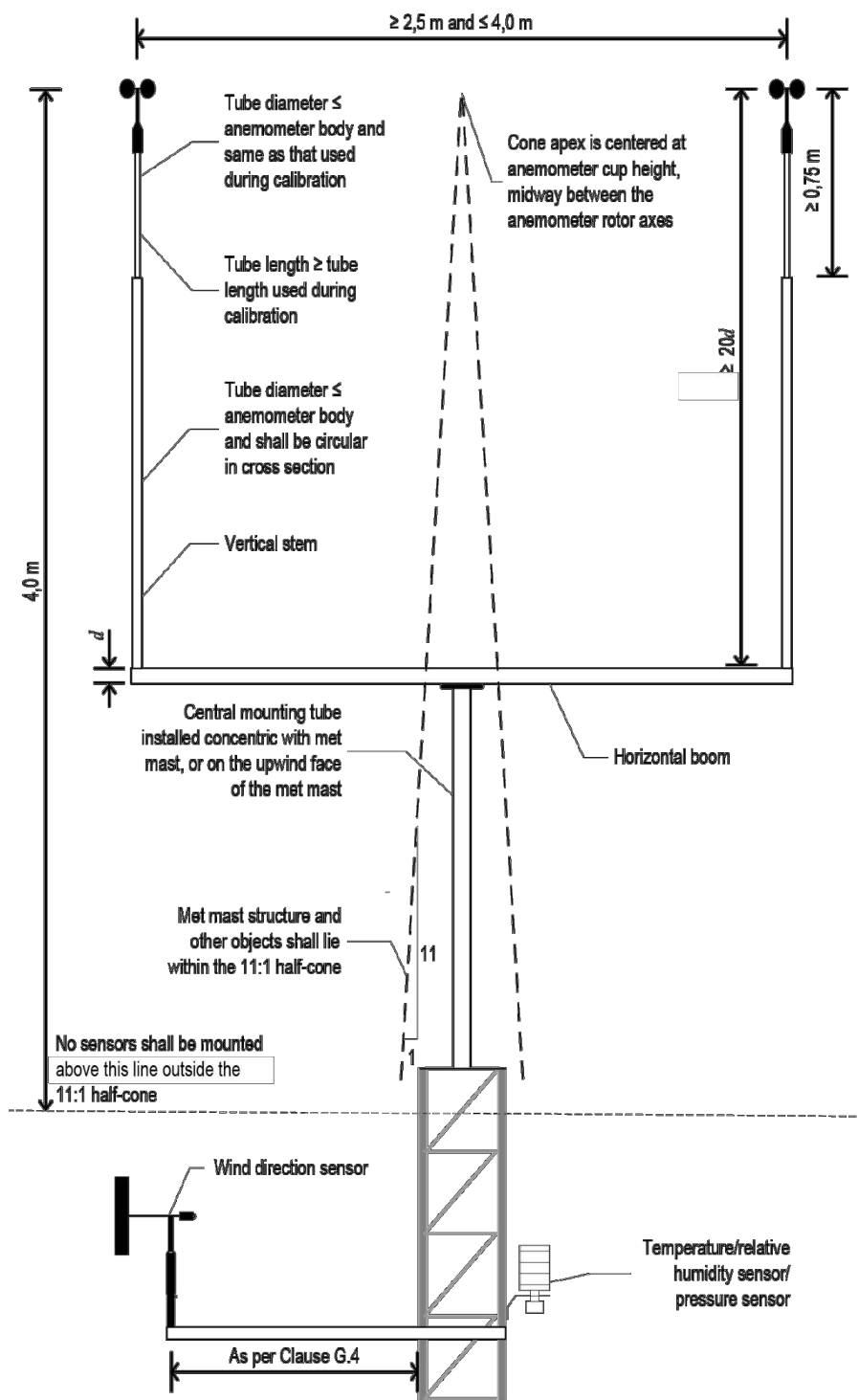
²⁹ Lorsque l'anémomètre est un type admissible d'anémomètre autre qu'un anémomètre à coupelles (p. ex.: un anémomètre à ultrasons), il convient d'interpréter le terme "coupelles" par des "éléments de mesure par détection" tout au long de la présente annexe.

³⁰ Le cône est défini par une base dont le diamètre est égal à la largeur caractéristique du mât (largeur maximale du mât ou saillies pour une distance de 4 m en dessous des coupelles) et une hauteur égale à 11 fois le rayon de sa base.

diamètre extérieur ($\pm 0,1$ mm) que celui utilisé pendant l'étalonnage (et la classification), ledit diamètre n'étant pas supérieur à celui du corps de l'anémomètre. La longueur combinée du tube et de l'anémomètre (mesurée au niveau des coupelles de l'anémomètre) doit être d'au moins 0,75 m. En outre, la stabilité de l'anémomètre doit être maintenue, ce qui peut nécessiter le montage d'un tube vertical de diamètre réduit concentrique à un autre tube de plus grand diamètre afin d'assurer une structure stable. Le tube supplémentaire ne peut pas avoir un diamètre plus grand que le corps de l'anémomètre pour une hauteur de 1,5 m en dessous des coupelles. Le support qui relie l'anémomètre au tube vertical doit être compact, lisse et symétrique. Lorsque l'anémomètre est conçu pour l'acheminement d'un câble interne dans le tube de support, le câble doit être acheminé à l'intérieur du tube vertical. Pour les autres configurations (p. ex.: fibres amorfes), il convient d'enrouler le câble autour du tube vertical (environ 3 r/min ou appliquer la procédure identique à celle utilisée pendant l'étalonnage et la classification). Il convient d'étalonner l'anémomètre avec un raccordement de câble et une configuration d'acheminement similaires à ceux qui doivent être utilisés sur le terrain. L'inclinaison de l'anémomètre (et du tube de montage) par rapport à la position verticale doit être inférieure à 2° . Il est recommandé de réaliser cette mesure à des fins de vérification. Aucun autre instrument ne doit être placé à moins de 1,5 m des coupelles de l'anémomètre ni à l'extérieur du demi-cône 11:1 pour une distance minimale de 4 m en dessous des coupelles. Dans ce cas, l'anémomètre de commande de l'anémomètre monté en tête de mât doit être un anémomètre monté latéralement situé à une distance comprise entre 4 m et 6 m en dessous de l'anémomètre monté en tête de mât et satisfaisant par ailleurs aux exigences relatives aux anémomètres montés latéralement données à l'Article G.4. La Figure G.1 représente un exemple de configuration de montage en tête de mât.

G.3 Anémomètres montés côte à côte en tête de mât

Pour le montage côte à côte, toutes les conditions de montage de l'Article G.2 doivent être satisfaites en plus des conditions ici spécifiées. Les coupelles de l'anémomètre doivent être montées au-dessus de la flèche à une hauteur minimale de 20 fois le diamètre de la flèche. Toutefois, il est recommandé d'utiliser la hauteur de 25 fois le diamètre de la flèche. La flèche, composée de la partie horizontale et des tiges verticales, doit avoir une section cylindrique. Les anémomètres doivent être séparés par une distance comprise entre 2,5 m et 4,0 m. Aucune partie du mât météorologique ne doit s'étendre au-delà du demi-cône 11:1 dont le vertex coïncide avec le point médian entre les coupelles des deux anémomètres montés en tête de mât. La flèche au sommet est elle-même exclue de la présente exigence sous réserve qu'elle satisfasse aux critères de dimensions antérieurs. Aucun autre instrument ne doit être placé à moins de 1,5 m des coupelles de l'anémomètre ni à l'extérieur du demi-cône 11:1 pour une distance minimale de 4 m en dessous des coupelles. La Figure G.2 représente un exemple de configuration de montage côte à côte. Il est recommandé de monter la flèche de façon concentrique par rapport à l'axe du mât météorologique ou au centre du côté exposé au vent du même mât. L'influence d'un anémomètre sur un autre anémomètre doit être évaluée et le secteur de mesure restreint afin que l'incertitude globale de mesure de la vitesse du vent soit contenue dans les limites souhaitées. L'incertitude due à la distorsion de l'écoulement provenant d'autres instruments, du mât météorologique et des flèches doit être déterminée.



IEC

Anglais	Français
Tube diameter $\leq$ anemometer body and same as that used during calibration	Diamètre du tube $\leq$ corps de l'anémomètre et identique à celui utilisé pour l'étalonnage
Cone apex is centered at anemometer cup height, midway between the anemometer rotor axes	Le sommet du cône est centré à la hauteur de l'anémomètre à coupelles, à mi-chemin entre les axes du rotor de l'anémomètre
Tube length $\geq$ tube length used during calibration	Longueur du tube $\geq$ longueur du tube utilisé pour l'étalonnage
Tube diameter $\leq$ anemometer body and shall be circular in cross section	Diamètre du tube $\leq$ corps de l'anémomètre et devant présenter une section circulaire
Vertical stem	Tige verticale

Anglais	Français
Central mounting tube installed concentric with met mast, or on the upwind face of the met mast	Tube de montage central installé de façon concentrique avec le mât météorologique, ou installé sur la face au vent du mât météorologique
Horizontal boom	Flèche horizontale
Met mast structure and other objects shall lie within the 11:1 half-cone	La structure du mât météorologique et les autres objets doivent être dans le demi-cône 11:1
No sensors shall be mounted above this line outside the 11:1 half-cone	Aucun capteur ne doit être monté au-delà de cette ligne à l'extérieur du demi-cône 11:1
Wind direction sensor	Capteur de direction du vent
Temperature/relative humidity sensor/pressure sensor	Capteur de température/d'humidité relative/de pression
As per Clause G.4	Conformément à l'Article G.4

Figure G.2 – Exemple d'anémomètre de commande et d'anémomètre principal alternatifs montés en tête de mât et côte à côte, avec une girouette et d'autres instruments sur la flèche

G.4 Instruments montés latéralement

G.4.1 Généralités

Les instruments montés latéralement comme les anémomètres et les capteurs de direction du vent sont influencés par la distorsion de l'écoulement du mât météorologique, de la flèche et des haubans. L'influence d'une flèche tubulaire cylindrique est de 0,5 % à une distance de séparation au-dessus de la flèche de 20 fois le diamètre de flèche. Il convient de maintenir la distorsion de l'écoulement à l'emplacement de la coupelle de l'anémomètre due aux flèches en dessous de 0,5 %. L'anémomètre doit être monté sur un tube vertical cylindrique de même diamètre extérieur ($\pm 0,1$ mm) que celui utilisé pendant l'étalonnage (et la classification), ledit diamètre n'étant pas supérieur à celui du corps de l'anémomètre. Il convient de monter les capteurs de direction du vent à une distance par rapport au mât météorologique au moins égale à la moitié de la distance recommandée pour les anémomètres. Une séparation verticale d'une valeur minimale de 20 fois le diamètre de la flèche doit exister entre les instruments montés latéralement et les flèches situées au-dessus. Cette exigence de séparation s'applique lorsqu'un anémomètre monté latéralement est utilisé comme anémomètre de commande d'un autre anémomètre monté latéralement à une hauteur différente, mais également lorsqu'un anémomètre monté latéralement est utilisé pour mesurer le cisaillement du vent à différentes hauteurs. Lorsque l'anémomètre monté latéralement est utilisé comme anémomètre de commande d'un autre anémomètre monté latéralement, la séparation verticale avec l'instrument principal doit être comprise dans la plage de 4 m à 6 m, avec les flèches latérales situées du même côté du mât et indiquant la même direction. Par ailleurs, la flèche latérale de l'anémomètre de commande peut être placée à la même hauteur que l'autre anémomètre monté latéralement mais en indiquant une direction différente de manière à ce que les exigences relatives à la distorsion de l'écoulement aux emplacements respectifs des deux anémomètres soient respectées dans le secteur de mesure.

Un anémomètre en exploitation dans le sillage du mât météorologique subit de fortes perturbations. Les mesures obtenues dans ces conditions ne doivent pas être utilisées pour l'analyse de performance de puissance. La distorsion de l'écoulement en amont du mât météorologique peut être significative. Une séparation adéquate doit être admise entre l'anémomètre et le mât météorologique afin de maintenir la distorsion de l'écoulement au niveau du mât météorologique en dessous de 1 %. Les lignes directrices pour une séparation appropriée entre l'anémomètre et le mât météorologique sont données aux Paragraphes G.4.2 et G.4.3.

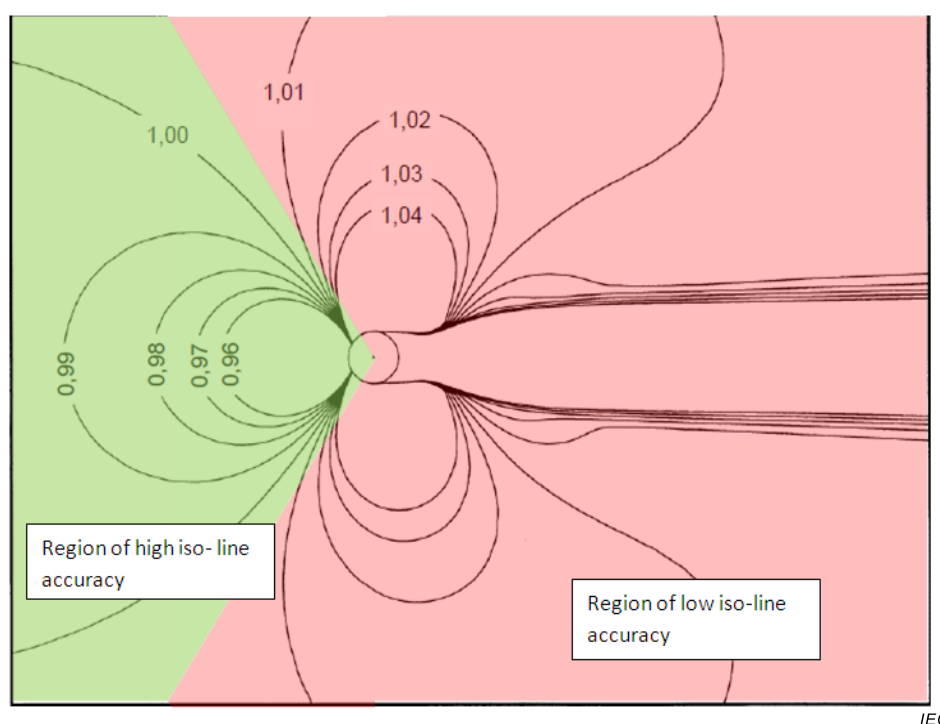
Les sillages créés par les haubans du mât météorologique peuvent avoir une forte influence sur les anémomètres sur des distances étonnamment longues. Le placement des anémomètres en aval des haubans doit être évité.

L'utilisateur est largement libre de déterminer quel est le degré acceptable de perturbation et donc d'incertitude, mais il convient que l'objectif soit d'éviter que les distorsions de l'écoulement produites par le mât météorologique et par la flèche dépassent respectivement 1 % et 0,5 %.

Les mâts météorologiques peuvent être de construction cylindrique ou en treillis. La séparation exigée entre l'anémomètre et le mât météorologique dépend du type et de la solidité du mât météorologique.

G.4.2 Mâts météorologiques tubulaires

Une approximation de la perturbation de l'écoulement à proximité d'un mât météorologique tubulaire peut être obtenue à la Figure G.3. La figure représente un tracé des isovitesse de l'écoulement autour d'un mât météorologique tubulaire d'après une analyse de Navier-Stokes. La perturbation la plus faible engendrée peut être observée avec un vent de face à un angle de 45°. De manière plus générale, un retard de l'écoulement du côté exposé au vent du mât météorologique, une accélération autour du mât et un sillage à l'arrière du mât peuvent être observés. En raison de la complexité de l'écoulement dans la surface influencée par le sillage du mât, la Figure G.3 ne doit être considérée comme précise que pour la zone face au vent où la perturbation est la plus faible, indiquée en vert sur la figure.



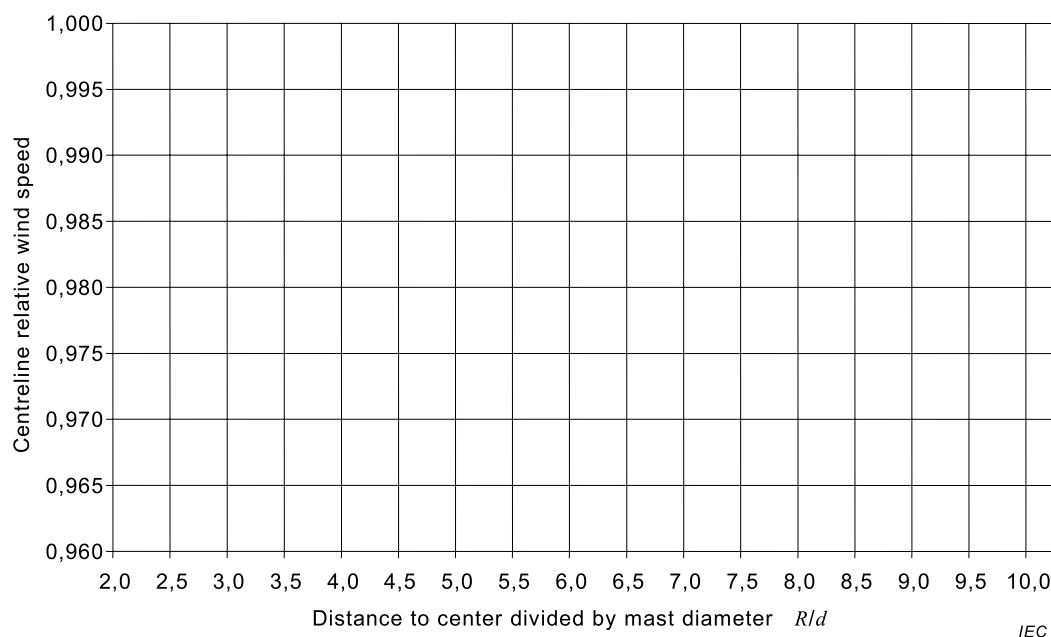
Anglais	Français
Region of high iso- line accuracy	Région de précision élevée des isolignes
Region of low iso- line accuracy	Région de faible précision des isolignes

NOTE La vitesse est normalisée par la vitesse du vent en champ libre (provenant de la gauche); analyse à l'aide des calculs de Navier-Stokes bidimensionnels selon lesquels la zone en vert à gauche est considérée comme précise et la zone en rouge à droite comme imprécise en raison des imprécisions de modélisation de l'écoulement à l'intérieur et à l'arrière de la zone de séparation.

Figure G.3 – Tracé des isovitesse de la vitesse locale d'écoulement autour d'un mât météorologique cylindrique

D'après la Figure G.3, il est évident qu'un anémomètre monté dans un secteur de $\pm 45^\circ$ par rapport à la direction du vent sur le côté exposé au vent du mât météorologique présente la distorsion la plus élevée de la vitesse du vent par rapport à l'écoulement libre lorsque l'anémomètre est directement du côté exposé au vent du mât météorologique. La Figure G.4

représente la vitesse du vent relative comme une fonction de la distance du côté exposé au vent du mât météorologique³¹.



Anglais	Français
Centreline relative wind speed	Vitesse du vent par rapport à l'axe central
Distance to center divided by mast diameter R/d	Distance à partir du centre divisée par le diamètre du mât R/d

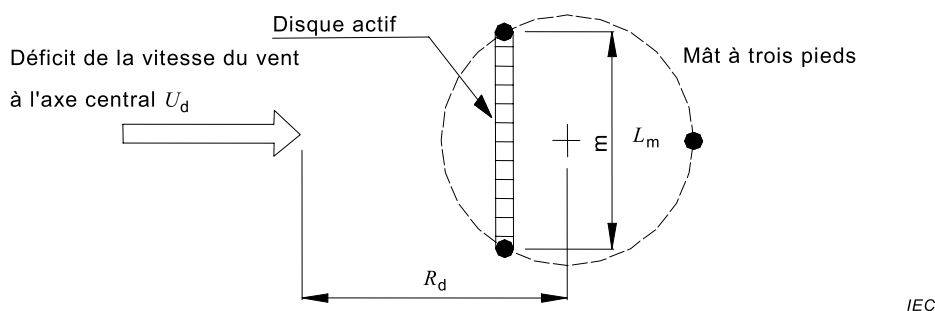
Figure G.4 – Vitesse du vent par rapport à l'axe central en fonction de la distance R_d à partir du centre d'un mât météorologique tubulaire et du diamètre d du mât météorologique

Une vitesse du vent relative à 99,5 % se produit lorsque $R_d/d = 8,2$. La valeur correspondante pour une vitesse du vent relative à 99 % est de 6,1.

G.4.3 Mâts météorologiques en treillis

L'analyse de l'écoulement autour d'une structure en treillis peut s'appuyer sur une combinaison d'analyses et des théories du disque actif et de Navier-Stokes. Le degré à partir duquel l'écoulement est perturbé par le mât météorologique est une fonction de la solidité dudit mât météorologique, de la traînée sur les éléments individuels, de l'orientation du vent et de la séparation du point de mesure du mât météorologique. La Figure G.5 donne les dimensions d'intérêt d'une vue de dessus d'un mât météorologique en treillis triangulaire.

³¹ Il est à noter que la distorsion de la vitesse du vent peut présenter des valeurs plus élevées que celles données à la Figure G.4 si les vents qui arrivent forment des angles supérieurs à 45° de l'alignement de l'anémomètre et du mât.



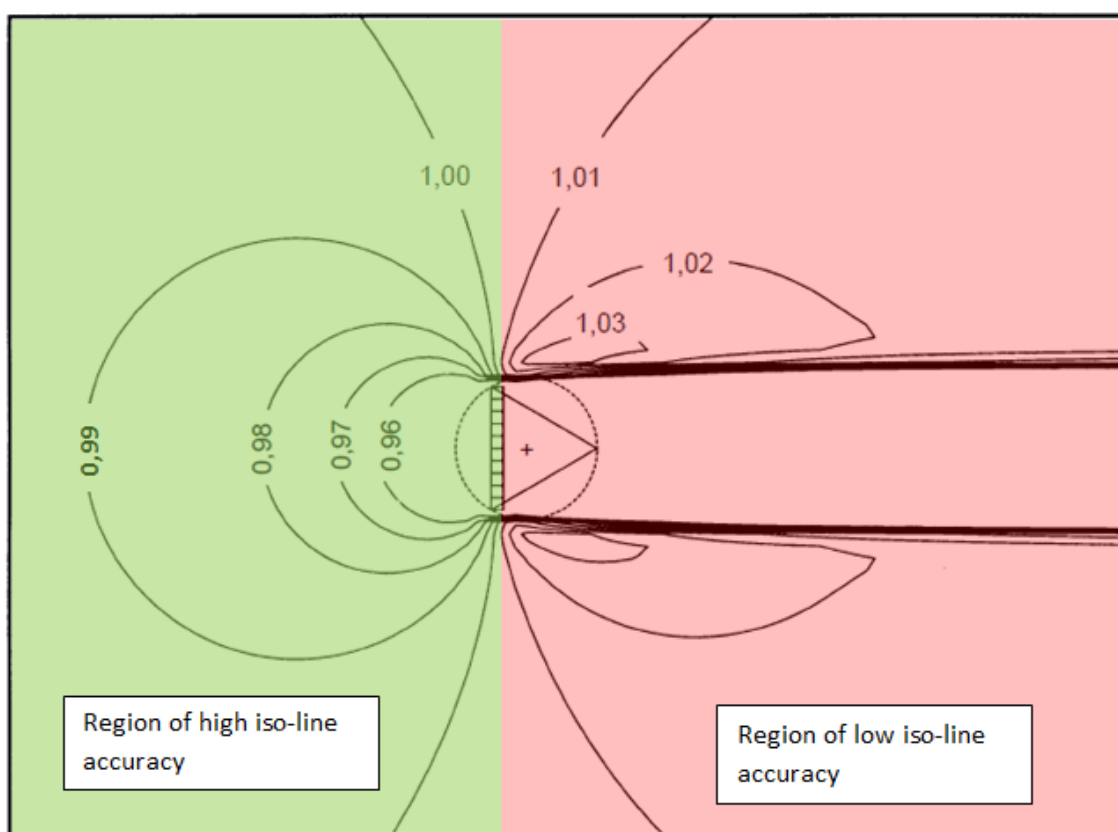
NOTE La figure donne le déficit de la vitesse du vent relative à l'axe central et la représentation du mât météorologique selon la théorie du disque actif avec la distance entre les pieds L_m et la distance R_d du centre du mât météorologique au point d'observation.

Figure G.5 – Représentation d'un mât météorologique en treillis à trois pieds

La distorsion de l'écoulement est une fonction du coefficient de poussée retenu par hypothèse, C_T , qui dépend quant à lui de la solidité du mât météorologique et de la traînée sur les éléments individuels. C_T peut être pris en compte comme la force de traînée totale par longueur d'unité du mât divisée par la pression dynamique et la distance entre les pieds L_m ³².

La Figure G.6 donne les résultats des calculs des écoulements autour d'un mât météorologique en treillis pour lequel $C_T = 0,5$. Pour des distances types de l'anémomètre avec $R_d > 2$ fois la distance entre les pieds du mât météorologique, cette perturbation de l'écoulement est très peu affectée par l'orientation du mât météorologique (si la face ou un angle est orienté dans le vent). Par conséquent, il peut être pris pour hypothèse qu'elle est similaire. Cependant, la Figure G.6 ne doit être considérée comme précise que pour la zone face au vent exposée à la perturbation la plus faible indiquée en vert sur la figure.

³² La distance entre les pieds doit représenter la largeur de face. En cas de diamètres de pieds consécutifs (diamètre du pied $> 5\%$ de la largeur de face), il convient d'ajouter l'un des diamètres du pied à la distance entre les centres des pieds pour obtenir la distance entre les pieds.

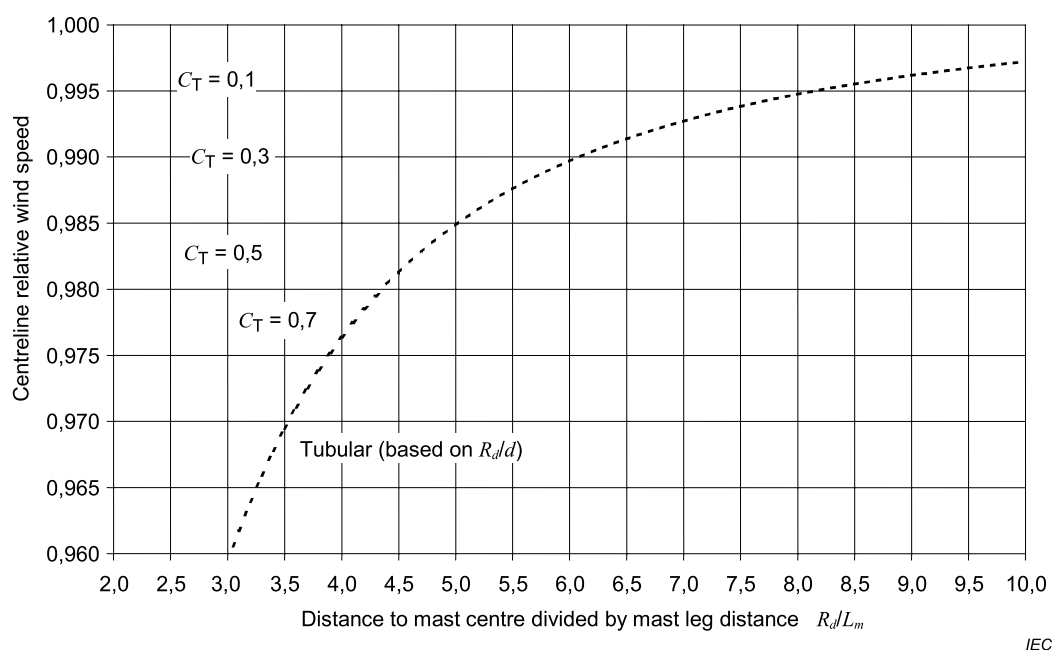


IEC

Anglais	Français
Region of high iso- line accuracy	Région de précision élevée des isolignes
Region of low iso- line accuracy	Région de précision faible des isolignes

NOTE La vitesse est normalisée par la vitesse du vent en champ libre (provenant de la gauche); analyse à l'aide des calculs de Navier-Stokes bidimensionnels et de la théorie du disque actif selon lesquels la zone en vert à gauche est considérée comme précise et la zone en rouge à droite comme imprécise en raison des imprécisions de modélisation de l'écoulement à l'intérieur et à l'arrière de la zone de séparation.

Figure G.6 – Tracé des isovitesses de la vitesse locale d'écoulement autour d'un mât météorologique en treillis triangulaire pour lequel $C_T = 0,5$



IEC

Anglais	Français
Centreline relative wind speed	Vitesse du vent par rapport à l'axe central
Tubular (based on R_d/d)	Tubulaire (basé sur R_d/d)
Distance to mast centre divided by mast leg distance R_d/L_m	Distance à partir du centre du mât divisée par la distance entre les pieds du mât R_d/L_m

Figure G.7 – Vitesse du vent par rapport à l'axe central en fonction de la distance R_d du centre d'un mât météorologique en treillis triangulaire et de la distance entre les pieds L_m pour plusieurs valeurs de C_T

En cas de distorsion de l'écoulement perpendiculaire à la face d'un mât météorologique, la distorsion minimale est obtenue lorsque l'anémomètre est placé à un angle de 90° de la direction de l'écoulement. Sinon, la distorsion de l'écoulement peut être déterminée en retenant l'hypothèse que le déficit face au vent est une fonction de la distance. La Figure G.7 donne les résultats des calculs des vitesses du vent relatives à l'axe central pour les mâts en treillis disposant de plusieurs valeurs de C_T . Il est néanmoins à noter que la distorsion de la vitesse du vent peut présenter des valeurs plus élevées que celles données à la Figure G.7 si les vents qui arrivent forment des angles supérieurs à 100° de l'alignement de la flèche de l'anémomètre.

L'équation ci-dessous peut être utilisée pour estimer le déficit de la vitesse du vent relative à l'axe central U_d comme une fonction de C_T et R_d/L_m :

$$U_d = 1 - \left(0,062C_T^2 + 0,076C_T \right) \cdot \left(\frac{L_m}{R_d} - 0,082 \right) \quad (\text{G.1})$$

C_T peut être estimé à partir des codes locaux de construction ou, dans les limites des plages spécifiées, à partir du Tableau G.1. Dans ce tableau, la solidité S est définie comme le rapport de la surface projetée par tous les éléments de la structure sur le côté du mât météorologique à la surface totale exposée.

Tableau G.1 – Méthode d'estimation de la valeur C_T pour divers types de mâts en treillis

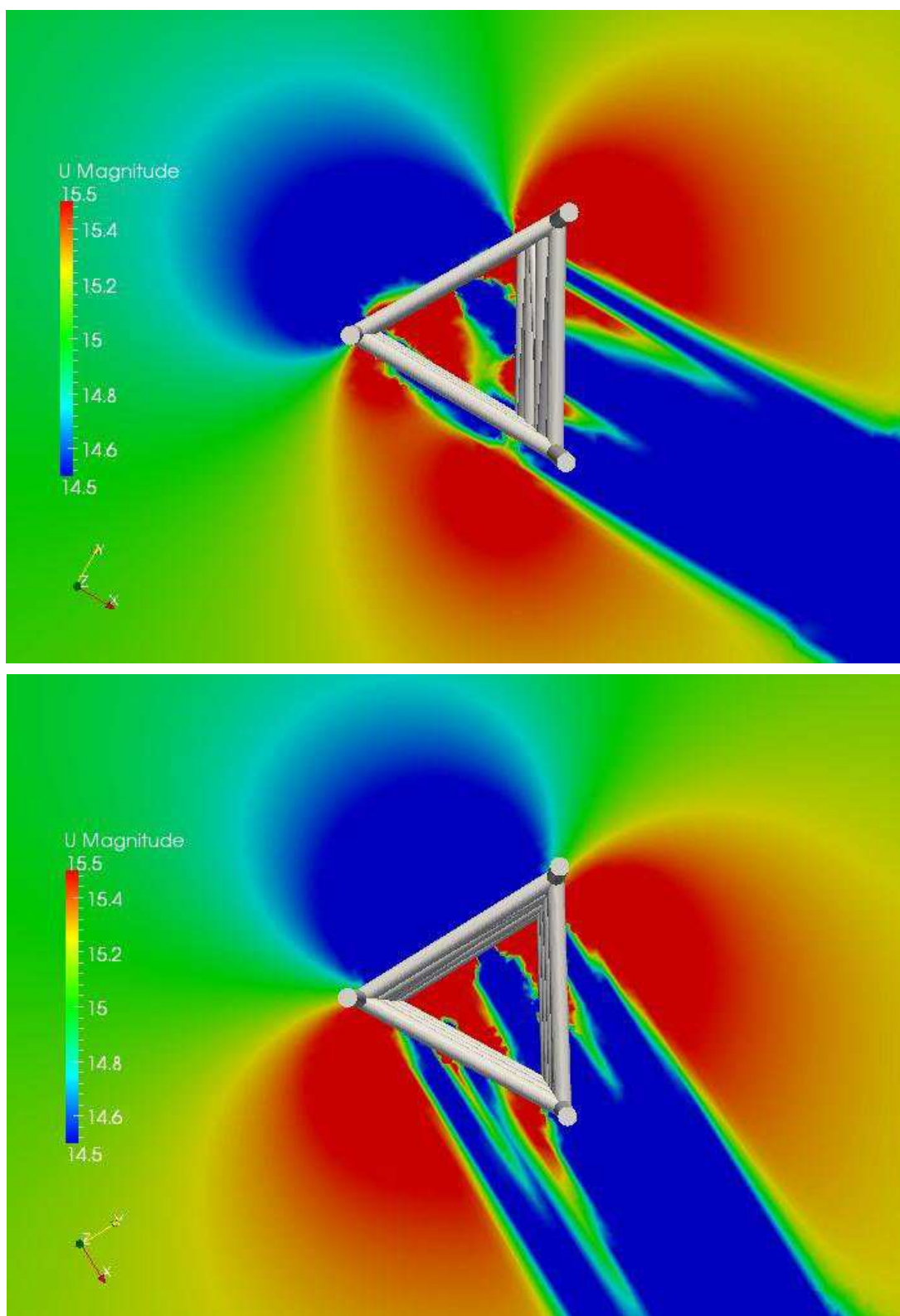
Type de mât	Plan de section	Expression de C_T	Plage valide
Section en carré, éléments avec extrémités saillantes		$4,4(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,5$
Section en carré, éléments cylindriques		$2,6(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,3$
Section triangulaire, éléments cylindriques		$2,1(1 - S)S$	$0,1 < S < 0,3$

Par ailleurs, si le déficit maximal souhaité de la vitesse du vent relative à l'axe central est spécifié, la distance R_d peut être obtenue par l'intermédiaire de l'équation suivante:

$$R_d = \frac{L}{\frac{1 - U_d}{(0,062C_T^2 + 0,076C_T)} + 0,082} \quad (\text{G.2})$$

Pour un mât météorologique en treillis avec $C_T = 0,5$ et un déficit de la vitesse du vent relative à l'axe central de 99,5 %, R_d doit correspondre à 5,7 fois la distance entre les pieds du mât météorologique L_m . Un déficit de la vitesse du vent de 99 % réduira la distance R_d à 3,7 fois la distance entre les pieds du mât météorologique.

Dans une certaine mesure, les équations, tableaux et graphiques ci-dessus représentent la géométrie du mât météorologique et les conditions d'écoulement idéalisées. Il convient de noter que l'interférence de l'écoulement sera considérablement plus complexe dans les cas pour lesquels les structures de support secondaires (p. ex.: ouvrages en treillis, châssis, échelles à câbles, brides et supports d'attache) sont également présentes au niveau ou à proximité de la hauteur de l'anémomètre ou pour lesquels la direction de l'écoulement n'est pas parallèle à l'axe de symétrie de la section du mât météorologique. La Figure G.8 représente l'écoulement (provenant de la gauche) déduit par la mécanique des fluides numérique (CFD) où la position relative, et donc l'influence du châssis sur la distorsion de l'écoulement varie en fonction de la hauteur. Il est à noter que la distorsion est asymétrique mais que l'emplacement optimal pour obtenir une distorsion minimale de l'écoulement reste à 90° de la direction de l'écoulement.



IEC

Anglais	Français
U Magnitude	Amplitude U

Figure G.8 – Distorsion de l'écoulement déduite par la mécanique des fluides numérique 3D pour deux directions différentes du vent autour d'un mât météorologique en treillis triangulaire ($C_T = 0,27$) – La flèche rouge en bas à droite de chaque figure indique la direction de l'écoulement

G.5 Protection contre la foudre

Un paratonnerre (attracteur) peut protéger les instruments montés en tête de mât. Si une protection contre la foudre est installée, certaines précautions doivent être prises. Il convient de monter le paratonnerre en tête de mât météorologique de sorte que:

- a) l'anémomètre soit séparé horizontalement du paratonnerre par au moins 30 fois le diamètre du paratonnerre;
- b) l'anémomètre ne soit pas dans le sillage du paratonnerre lorsque le vent est dans le secteur de mesure.

Lorsque ces conditions ne peuvent pas être satisfaites, la distorsion de l'écoulement sur l'anémomètre doit être évaluée. En outre, une incertitude supplémentaire doit être ajoutée.

G.6 Montage d'autres instruments météorologiques

Il convient de placer l'anémomètre de commande aussi près que possible de l'anémomètre primaire, tout en continuant de satisfaire aux exigences de séparation minimales des Articles G.2 à G.4 afin d'assurer une bonne corrélation entre les deux instruments au cours de l'essai. Il convient de valider cette corrélation pour garantir que l'étalonnage de l'anémomètre primaire ne varie pas pendant l'essai. Cependant, l'anémomètre de commande ne doit pas interférer avec l'anémomètre primaire. Il doit également être exempt de toute perturbation de l'écoulement provoquée par d'autres instruments.

Le capteur de direction du vent doit être monté entre 4 m et 10 m en dessous de l'anémomètre primaire. Il doit être monté de façon à réduire le plus possible les effets de distorsion de l'écoulement par rapport au secteur de mesure. Il convient que la séparation horizontale du capteur de direction du vent et du mât météorologique soit égale à au moins la moitié de celle exigée pour un anémomètre.

Excepté lorsqu'un mât météorologique dont la hauteur est inférieure à celle du moyeu est utilisé en association avec un dispositif de télédétection, les capteurs de température, d'humidité et de pression doivent être situés à moins de 10 m de la hauteur du moyeu du mât météorologique, à une distance minimale de 1,5 m en dessous de l'anémomètre primaire, tout en satisfaisant aux exigences de montage relatives aux autres instruments définies dans les Articles G.2 et G.3. Le capteur de température doit être monté dans une zone équipée d'une protection contre le rayonnement. Le capteur de pression peut être monté dans un caisson protégé contre les intempéries. Cependant, il convient de redoubler d'attention pour s'assurer que le caisson est bien exposé au vent. Ainsi, les relevés de pression ne sont pas influencés par la distribution de la pression autour dudit caisson.

Si le mât météorologique disponible pour l'essai de performance de puissance présente une hauteur inférieure à celle du moyeu (en particulier lorsqu'il est utilisé en association avec un dispositif de télédétection; voir Annexe L), les capteurs de température, d'humidité et de pression doivent être situés à une hauteur comprise entre 1,5 m et 10 m de l'anémomètre primaire. La pression atmosphérique doit être ajustée à la hauteur du moyeu conformément à la présente norme. En outre, la température de l'air doit être ajustée à la hauteur du moyeu en prenant pour hypothèse que l'atmosphère varie conformément aux propriétés d'atmosphère type données dans l'ISO 2533:1975. Par ailleurs, un capteur de température doit être monté sur la nacelle de l'éolienne. Il doit être monté au moins 1 m au-dessus de la nacelle et du côté exposé au vent des systèmes de ventilation existants, le cas échéant.

La Figure G.1 et la Figure G.2 donnent des exemples de configurations adaptées à d'autres instruments météorologiques et aux anémomètres montés en tête de mât.

Annexe H (normative)

Essai de performance de puissance sur les petites éoliennes

H.1 Généralités

Les petites éoliennes (définies par l'IEC 61400-2) exigent des dispositions spéciales pour les essais de performance de puissance. Les chargeurs de batteries éoliens doivent notamment être soumis à l'essai dans des conditions de fonctionnement normal mais en réduisant ou éliminant l'influence de la configuration particulière des batteries et des conditions utilisées au cours de l'essai. En outre, les éoliennes qui utilisent des onduleurs pour le raccordement au réseau électrique doivent être soumises à l'essai en conjonction avec ces onduleurs afin que les résultats soient représentatifs d'un fonctionnement normal. Dans tous les cas, la puissance en question est utile au consommateur. Ainsi, la puissance correspond à la puissance injectée au réseau pour les éoliennes raccordées au réseau électrique. Il en va de même pour la puissance fournie aux batteries pour les chargeurs de batteries éoliens. Lorsqu'une petite éolienne est soumise à l'essai, toutes les exigences décrites dans la présente norme doivent être satisfaites, avec les additions et modifications ci-après.

H.2 Définitions

Puissance maximale P_{60} : puissance de sortie maximale moyennée sur 1 min qu'une éolienne en conditions de fonctionnement normal en régime établi produira (la crête de puissance de sortie instantanée peut être plus élevée).

Puissance de référence: niveau de puissance moyenné sur la tranche de vitesse du vent de 11 m/s.

Production annuelle d'énergie de référence: L'*AEP* mesurée à une vitesse du vent moyenne annuelle de 5 m/s, distribuée d'après la fonction de Rayleigh, en utilisant la courbe de puissance corrigée en fonction de la masse volumique de l'air au niveau de la mer.

H.3 Définition et installation d'un système éolien

Conformément au Paragraphe 6.2, les éléments suivants sont exigés:

- a) Lors de la caractérisation de la performance de charge des batteries, l'aérogénérateur doit inclure l'éolienne, le mât de l'éolienne, le système de contrôle de l'éolienne, le câblage entre l'éolienne et la charge ainsi que le système de contrôle de la charge, à savoir un dispositif de protection en tension qui réduit la puissance de sortie de l'éolienne lorsque les batteries sont complètement chargées. Il peut inclure une charge de délestage qui est utilisée pour dissiper l'énergie de l'éolienne lorsque les batteries sont complètement chargées. L'aérogénérateur n'inclut pas de banc de batteries, car il est considéré comme partie intégrante de la charge. D'autres dispositifs d'accumulation d'énergie peuvent se substituer aux batteries tout au long du présent article;
- b) lors de la caractérisation de la sortie du système vers un réseau électrique, l'aérogénérateur doit inclure l'éolienne, le mât de l'éolienne, le système de contrôle de l'éolienne, le câblage entre l'éolienne et la charge ainsi que les systèmes de contrôle supplémentaires. En outre, le système peut inclure un onduleur de tension. Si un transformateur est installé entre l'onduleur de tension et le réseau électrique, il peut être considéré comme partie intégrante de l'aérogénérateur ou de la charge. Si le système éolien raccordé au réseau électrique intègre un banc de batteries et/ou une charge de délestage, cela doit être considéré comme partie intégrante du système;
- c) l'éolienne doit être raccordée à une charge électrique représentative de la charge pour laquelle elle est conçue. Pour les applications de charge de batteries, la charge est

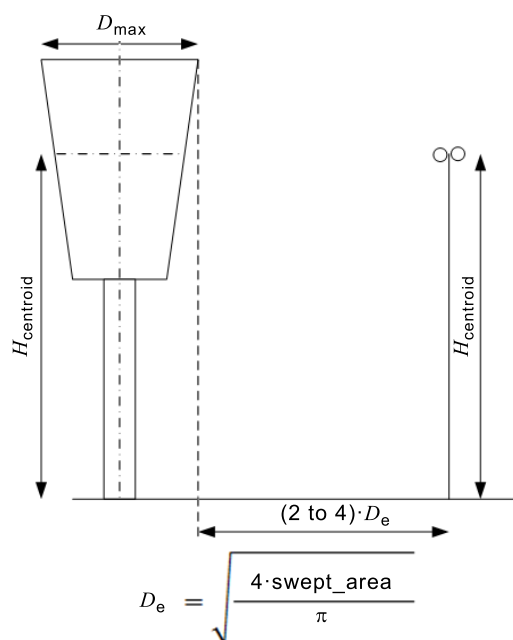
composée d'un banc de batteries, d'un régulateur de tension et d'un moyen de dissiper la puissance qui traverse le régulateur de tension (ou la charge de délestage). Dans une configuration d'essai idéale, le banc de batteries ne stocke pas l'énergie produite par l'éolienne. Il est préférable que toute la puissance de sortie de l'éolienne soit acheminée vers le régulateur de tension. Le banc de batteries peut donc être plus de taille inférieure à la taille habituellement recommandée pour les éoliennes à condition que la tension au niveau du raccordement de l'éolienne à la charge puisse être maintenue dans les limites des spécifications mentionnées ci-dessous;

- d) l'éolienne doit être installée à l'aide du système de montage spécifié par le fabricant. Si une éolienne n'est pas fournie avec un système de montage spécifique, il convient de monter l'aérogénérateur à une hauteur du moyeu minimale de 10 m;
- e) afin de réduire le plus possible les différences de résultats dues au câblage entre l'éolienne et la charge, la longueur totale des câbles, mesurée de la base du mât à la charge, doit être au minimum de 8 fois le diamètre du rotor. Le câblage entre la petite éolienne et la charge doit être conforme aux spécifications du fabricant pour cette longueur de câble. Si les spécifications indiquent une plage de tailles de câbles, les tailles des câbles doivent être aussi proches que possible de la moyenne de cette plage. Si aucune spécification n'est fournie, le câblage doit être dimensionné de manière à ce que la chute de tension entre l'aérogénérateur et la charge soit équivalente à 10 % de la tension nominale à la puissance assignée;
- f) le régulateur de tension doit être capable de maintenir la tension au niveau du raccordement de l'éolienne à la charge dans les 10 % des réglages donnés au Tableau H.1 sur la totalité de la plage de puissances de sortie de l'éolienne. La moyenne sur une période de 1 min de la tension de charge doit se situer dans les 5 % des réglages donnés au Tableau H.1 pour être intégrée à l'ensemble de données utilisable.

H.4 Emplacement du mât météorologique

Conformément à 6.3.2, les éléments suivants sont exigés:

- a) S'il est plus pratique de monter l'anémomètre sur une longue flèche raccordée à la tour de l'éolienne, un mât météorologique séparé n'est pas exigé. Afin de réduire le plus possible la distorsion de l'écoulement sur la surface du rotor de la petite éolienne engendrée par les sillages de l'anémomètre, de la girouette et de leur matériel de montage, toutes ces composantes doivent être placées à une distance minimale de 3 m de toute partie du rotor de l'éolienne. En outre, il convient de configurer le montage de l'anémomètre de façon à réduire le plus possible sa surface de section au-dessus du niveau correspondant à 1,5 fois le diamètre du rotor en dessous de la hauteur du moyeu. La flèche doit être installée de manière à ce que les vibrations de la structure ne soient pas introduites dans le signal de vitesse du vent;
- b) Pour les éoliennes à axe vertical, la hauteur du moyeu est définie comme la hauteur du centroïde de la surface balayée par le rotor de l'éolienne;
- c) Pour les éoliennes à axe vertical, la distance entre l'éolienne et le mât météorologique est représentée à la Figure H.1.



IEC

Anglais	Français
2 to 4	2 à 4

Figure H.1 – Définition de la hauteur du moyeu et de l'emplacement du mât météorologique pour les éoliennes à axe vertical

H.5 Matériel d'essai

- en 7.1: pour mesurer les sorties en courant continu pour les chargeurs de batteries éoliens présentant une surface balayée de 40 m² ou moins, l'utilisation d'un matériel avec une précision de 2 % ou plus est admise pour la mesure du courant et de la puissance, au lieu de la précision de 0,5 % mentionnée en 7.1;
- également en 7.1: la puissance de sortie de l'éolienne doit être mesurée au niveau du raccordement à la charge (voir Article H.3);
- également en 7.1: outre la puissance électrique, la tension au niveau du raccordement à la charge doit être mesurée afin de garantir la conformité aux exigences de l'Article H.3;
- également en 7.2.2: il convient de suivre les lignes directrices relatives au montage de l'anémomètre données à l'Annexe G. Si des écarts sont créés, les raisons doivent en être documentées dans le rapport d'essai et une incertitude supplémentaire doit être ajoutée à l'analyse. Dans certains cas extrêmes, il est admis d'utiliser temporairement un anémomètre autre que l'anémomètre de commande si l'existence d'une bonne corrélation entre l'anémomètre de commande et son troisième anémomètre peut être démontrée. Une incertitude supplémentaire devra être utilisée pour l'analyse afin de tenir compte des incertitudes de la corrélation;
- également en 7.2.3: l'anémomètre doit être monté en tête de mât météorologique à une hauteur du moyeu de ± 2 % par rapport au sol à l'emplacement du mât météorologique;
- en 7.2.6: aucun cisaillement du vent ne doit être mesuré;
- en 7.4: la mesure de l'humidité relative et de sa correction est facultative;
- également en 7.4: les capteurs de température de l'air, de pression atmosphérique et d'humidité, le cas échéant, doivent être montés de manière à être situés à une distance verticale minimale de 1,5 fois le diamètre du rotor par rapport à la hauteur du moyeu et à une distance horizontale dans un rayon de 100 m du moyeu;
- en 7.7: la surveillance de l'état de la petite éolienne est recommandée mais pas exigée.

H.6 Procédure de mesure

- a) en 8.2: si le système de contrôle de la charge de l'éolienne réduit la sortie de l'éolienne au réglage facultatif de haute tension, le système de contrôle de la charge peut être ajusté à une plus haute tension. Si le système de contrôle de la charge est ajusté, le rapport d'essai doit documenter les réglages avant et après l'ajustement. Tous les autres ajustements apportés aux systèmes de contrôle de l'éolienne doivent être clairement indiqués dans le rapport;
- b) en 8.3: les données prétraitées doivent avoir une durée minimale de 1 min. Toutes les références ultérieures aux ensembles de données de 10 min dans la présente norme doivent appliquer des ensembles de données de 1 min pour les essais des petites éoliennes;
- c) en 8.4: ajouter un tiret pour le rejet des données
 - la moyenne sur 1 min de la tension de charge n'est pas comprise dans les 5 % des réglages donnés au Tableau H.1;
- d) en 8.5: la base de données doit être considérée comme complète lorsqu'elle a satisfait aux critères suivants:
 - 1) chaque tranche de vitesse du vent comprise entre 1 m/s en dessous de la vitesse de démarrage et 14 m/s doit contenir des données échantillonnées sur un minimum de 10 min;
 - 2) la base de données complète compte au moins 60 h de données, la petite éolienne étant comprise dans la plage de vitesses du vent définie au point 1);
 - 3) pour les éoliennes équipées d'un système d'effacement du rotor, il convient que les tranches de vitesse du vent complètes caractérisant la performance lorsque le rotor de l'éolienne est effacé figurent dans la base de données;
- e) il est recommandé d'obtenir des données supplémentaires de performance afin de quantifier l'effet que les variations de la tension du banc de batteries ont sur la performance de l'éolienne. Il convient d'obtenir ces courbes de puissance supplémentaires en définissant la tension du banc de batteries sur les réglages facultatifs de haute et basse tension donnés au Tableau H.1 et en se procurant au moins 30 h de données à l'aide d'un pré-moyennage sur une durée de 1 min. Lors de la génération du rapport relatif à ces courbes de puissance, les tableaux et graphiques doivent clairement afficher la performance pour les réglages facultatifs de haute et basse tension et doivent indiquer ces réglages de tension. Il est recommandé d'utiliser un seul graphique pour afficher les variations de la puissance en fonction de la vitesse du vent et de la tension du banc de batteries.

Tableau H.1 – Réglages de la tension du banc de batteries

Tension nominale V	Réglage exigé V	Réglage facultatif de basse tension V	Réglage facultatif de haute tension V
12	12,6	11,4	14,4
24	25,2	22,8	28,8
36	37,8	34,2	43,2
48	50,4	45,6	57,6
Autre	2,1*	1,9*	2,4*
* Volts par élément de batterie			

H.7 Résultats déduits

- a) en 9.1: pour les éoliennes avec contrôle de la puissance passive, notamment avec système d'effacement du rotor ou de flottement des pales, la vitesse du vent doit être normalisée par rapport au niveau de la mer à l'aide de l'Equation (14) (normalisation de la vitesse du vent), de l'Equation (13) (normalisation de la puissance) ou d'une autre méthode. Pour justifier l'utilisation d'une méthode alternative, une documentation doit être

fournie. Toutefois, si l'éolienne est déjà réglée pour s'adapter à la masse volumique de l'air spécifique au site, il convient d'indiquer ce réglage dans le rapport et aucune normalisation supplémentaire n'est admise;

- b) en 9.1.6: pour les petites éoliennes, la correction des turbulences n'est pas recommandée. Si elle est néanmoins réalisée, le rapport doit indiquer si la méthode est appliquée pour des moyennes de puissance et de vitesse du vent mesurées d'une durée de 1 min au lieu de 10 min, et si ces valeurs sont admises. Si la correction des turbulences est appliquée, les courbes de puissance avec et sans correction des turbulences doivent être indiquées dans le rapport et clairement identifiées;
- c) en 9.3: dans les cas où la petite éolienne ne s'arrête pas en cas de vents forts, l'*AEP* mesurée et l'*AEP* extrapolée doivent être calculées comme si la vitesse de coupure était la plus élevée, en retenant la plus grande valeur entre la tranche de vitesse du vent complétée ou 25 m/s.

H.8 Rapports

A l'Article 10: outre les informations de l'Article 7, la description de l'éolienne et du montage d'essai doit inclure les éléments suivants:

- a) les tailles, les matériaux conducteurs, les types, les longueurs et les connecteurs des câbles utilisés pour raccorder l'éolienne à la charge;
- b) le ou les réglages de tension pour tous les dispositifs de protection contre les surtensions et les sous-tensions intégrés à l'aérogénérateur;
- c) la tension nominale du banc de batteries (p. ex.: 12 V, 24 V, 48 V);
- d) la taille du banc de batteries (c'est-à-dire la capacité en ampères-heures), le type et la durée de vie de la batterie;
- e) la description comprenant la marque, le modèle et les spécifications du régulateur de tension utilisé pour maintenir la tension du banc de batteries dans les limites spécifiées;
- f) la puissance de référence;
- g) la production annuelle d'énergie calculée d'après l'*AEP* mesurée et la fonction de Rayleigh pour la distribution des vitesses du vent avec une vitesse du vent moyenne de 5 m/s et la courbe de puissance normalisée par rapport à la masse volumique de l'air au niveau de la mer doit être indiquée dans le rapport comme l'énergie annuelle de référence;
- h) une intensité des turbulences d'une durée de 1 min pour chaque ensemble de données (séquentiel, non fractionné, chronologique) sous forme d'un diagramme de dispersion pour la plage de vitesses du vent observée.

H.9 Annexe A – Evaluation de l'influence des éoliennes et des obstacles sur le site d'essai

- a) Les exigences données au Tableau A.1 peuvent être assouplies afin de s'adapter aux petites éoliennes, mais il convient d'inclure une incertitude supplémentaire relative à l'incertitude de vitesse du vent. Cependant, les autres sections de l'Annexe A (à savoir la méthode pour les secteurs exclus à cause des obstacles) ne doivent pas être négligées.

H.10 Annexe B – Evaluation du terrain sur le site d'essai

- a) En fonction des environnements types dans lesquels les petites éoliennes sont installées, les exigences de pente maximale du Tableau B.1 peuvent être augmentées jusqu'à 10 % pour toutes les distances et toutes les directions. Toutefois, il convient d'ajouter une incertitude supplémentaire de la vitesse du vent.

H.11 Annexe C – Procédure d'étalonnage du site

- a) en C.3.2: il n'est pas recommandé de fournir des mesures supplémentaires pour caractériser le cisaillement du vent. Cela inclut les mesures de la vitesse verticale du vent et de la déviation de la trajectoire du vent;
- b) à l'Article C.5: ignorer l'analyse du cisaillement du vent et de la stabilité atmosphérique;
- c) également à l'Article C.5: aucune mesure du cisaillement du vent n'est exigée au niveau des deux mâts météorologiques;
- d) également à l'Article C.5: pour chaque point de données d'une durée de 1 min, le rapport de vitesses du vent doit être calculé, soit la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à l'emplacement du mât météorologique représentant l'éolienne divisée par la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à l'emplacement du mât météorologique de référence;
- e) en C.5.1 et en C.5.2: ces paragraphes seront ignorés;
- f) en C.5.3: ce paragraphe sera utilisé pour l'analyse d'étalonnage du site;
- g) concernant l'étalonnage du site pour de petites éoliennes, il est acceptable d'utiliser la tour de support de l'éolienne plutôt qu'un mât météorologique à l'emplacement de l'éolienne, sous réserve de satisfaire aux exigences de distorsion de l'écoulement.

Annexe I **(normative)**

Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons

I.1 Généralités

Les anémomètres à coupelles et à ultrasons sont des instruments de mesure qui peuvent être utilisés pour les mesures de performance de puissance. Afin de transférer la traçabilité, ils doivent être étalonnés dans une soufflerie conformément à l'Annexe F. L'étalonnage des souffleries est effectué dans des conditions environnementales contrôlées avec un écoulement lisse et peu turbulent. Lors des mesures et de l'exploitation sur site, ces instruments sont toutefois soumis à un écoulement turbulent et à des conditions environnementales qui peuvent différer de manière significative par rapport aux conditions d'étalonnage de la soufflerie. Les conditions du site peuvent influencer de façon significative les caractéristiques de l'instrument et provoquer un écart entre les résultats donnés par l'instrument et les étalonnages de la soufflerie. Si les plages des paramètres d'influence lors de l'exploitation sur site sont déterminées, les écarts systématiques peuvent être analysés et les écarts dans les résultats des instruments peuvent être intégrés à un système de classification.

Les paramètres d'influence connus sur les mesures des anémomètres à coupelles sont les turbulences, la température de l'air, la masse volumique de l'air et l'angle d'écoulement ascendant moyen. Les paramètres d'influence connus sur les mesures des anémomètres à ultrasons sont la direction du vent, l'angle d'écoulement ascendant et la température de l'air. Ces paramètres d'influence doivent être pris en compte dans la classification. D'autres paramètres environnementaux peuvent influencer les instruments. S'il est admis que ces paramètres d'influence donnent des écarts systématiques, leur influence doit être analysée et incluse dans le système de classification. L'effet combiné de tous les paramètres d'influence doit en outre être évalué. Les écarts systématiques dus aux paramètres d'influence doivent être analysés conformément aux procédures décrites à l'Annexe J et donner lieu à une spécification de classification du type de l'anémomètre. Au moins cinq échantillons du type d'anémomètre doivent être évalués. La modification d'un type d'anémomètre qui peut avoir une influence sur le résultat exige une nouvelle évaluation. Les modifications apportées à la géométrie du type d'anémomètre, au principe de mesure, à l'algorithme logiciel pour le calcul de la sortie, aux paramètres logiciels ou à la géométrie de la structure de support exigent une nouvelle évaluation.

La méthode de classification ne prend en compte qu'une exploitation normale des capteurs. La méthode ne tient pas compte, par exemple, de l'usure, des dysfonctionnements ou du givrage (voir Annexe O).

I.2 Classes de classification

La classification des types d'anémomètres est divisée en cinq classes en fonction de l'objectif. Les classes A, B, C et D se basent sur des plages de terrains et de climats prédéfinies (voir Tableau I.1). Les classes A et C doivent être utilisées pour les terrains qui satisfont aux exigences de l'Annexe B et au terrain de type A en C.3.1. Les classes B et D doivent être utilisées pour les terrains qui ne satisfont pas aux exigences de l'Annexe B. Les classes B et D pourraient être utilisées dans un terrain de type B en C.3.1. Si des informations sur les plages des paramètres d'influence lors des mesures sont disponibles, la classe S peut être utilisée.

La classe S est une classe spéciale, dans laquelle les plages des paramètres d'influence peuvent être définies par l'utilisateur (voir Tableau I.1). Elle peut être destinée à un climat spécial, par exemple d'un climat froid (voir Annexe O). La classe S peut également être utilisée pour estimer l'incertitude lors d'une campagne de mesures, où les plages des

paramètres d'influence sont déterminées lors des mesures. La classe S peut être utilisée pour les mesures dans les terrains de type A, B et C (voir C.3.1).

Le numéro de classification k doit être utilisé pour déterminer l'incertitude liée aux caractéristiques opérationnelles de la vitesse du vent, comme indiqué à l'Annexe D (Tableau D.1).

L'Annexe B fournit une évaluation du terrain, afin d'évaluer si la distorsion de l'écoulement due au terrain sera significative. Pour la classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons, cette évaluation du terrain prend en charge la définition des classes de classification A, B, C et D.

- Classe A: Associée aux terrains qui satisfont aux exigences de l'Annexe B et aux plages des paramètres d'influence générales pour ce type de terrain.
- Classe B: Associée aux terrains qui ne satisfont pas aux exigences de l'Annexe B et aux plages des paramètres d'influence générales pour ce type de terrain.
- Classe C: Comme pour la classe A, mais avec des températures jusqu'à -20 °C .
- Classe D: Comme pour la classe B, mais avec des températures jusqu'à -20 °C .

Pour un terrain ou un climat qui s'écarte des classes A à D, un climat de classe S peut être spécifié.

- Classe S: Associée à des conditions qui s'écartent des classes A, B, C ou D. Dans cette classe, l'utilisateur définit les plages des paramètres d'influence. Cela peut être dû à des conditions climatiques ou de terrain particulières ou définies par l'utilisateur.

I.3 Plages des paramètres d'influence

Les plages minimales de paramètres d'influence nécessaires pour la classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons sont données au Tableau I.1.

I.4 Classification des anémomètres à coupelles et à ultrasons

La classification d'un anémomètre est spécifiée par la quantité d'écarts systématiques par rapport aux valeurs étalonnées (étalonnage conforme à l'Annexe F), lorsque les écarts systématiques sont déterminés pour des valeurs comprises dans les plages des paramètres d'influence. Pour un anémomètre à ultrasons et pour des anémomètres à coupelles sensibles à la direction, une direction de référence utilisée pour les étalonnages conformément à l'Annexe F doit être définie pour le type d'instrument. Les écarts systématiques doivent être déduits pour toutes les valeurs pertinentes pour la détermination de la classe entre les valeurs minimale et maximale de chaque paramètre. Le numéro de classe k_n d'un numéro d'échantillon d'anémomètre n doit être déterminé comme l'écart systématique maximal par rapport à la valeur d'étalonnage de la soufflerie, pondérée à l'aide de la fonction de vitesse du vent ε_i :

$$k_n = 100 \cdot \max |\varepsilon_i / w_i| \quad (\text{I.1})$$

où

k_n est le numéro de classe du numéro de l'échantillon d'anémomètre n ($n=1\dots 5$ ou plus);

w_i est une fonction de pondération en m/s qui définit l'enveloppe des écarts (voir Equation (I.2));

ε_i est l'écart en m/s pour la combinaison des paramètres d'influence i .

La fonction de pondération w_i moyenne l'influence des écarts absolu et relatif³³:

$$w_i = 5 \text{ m/s} + 0,5 \cdot U_i \quad (I.2)$$

où

U_i est la vitesse du vent en m/s pour la combinaison des paramètres d'influence i .

**Tableau I.1 – Plages des paramètres d'influence (moyennes de 10 min)
des classes A, B, C, D et S**

	Classe A Le terrain satisfait aux exigences de l'Annexe B	Classe B Le terrain ne satisfait pas aux exigences de l'Annexe B	Classe C Le terrain satisfait aux exigences de l'Annexe B	Classe D Le terrain ne satisfait pas aux exigences de l'Annexe B	Classe S³⁴ Classe spéciale avec plages définies par l'utilisateur
	Plage	Plage	Plage	Plage	Plage
Vitesse du vent V (m/s)	4 à 16	4 à 16	4 à 16	4 à 16	4 à 16
Intensité des turbulences	0,03 à 0,12 + 0,48/ V	0,03 à 0,12 + 0,96/ V	0,03 à 0,12 + 0,48/ V	0,03 à 0,12 + 0,96/ V	Défini par l'utilisateur
Structure des turbulences ³⁵ $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	1/0,8/0,5*	1/0,8/0,5*	1/0,8/0,5*	1/0,8/0,5*	Défini par l'utilisateur ou 1/0,8/0,5*
Température de l'air (°C)	0 à 40	–10 à 40	–20 à 40	–20 à 40	Défini par l'utilisateur
Masse volumique de l'air (kg/m ³);	0,9 à 1,35	0,9 à 1,35	0,9 à 1,35	0,9 à 1,35	Défini par l'utilisateur
Angle d'écoulement ascendant moyen (°)	–3 à 3	–15 à 15	–3 à 3	–15 à 15	Défini par l'utilisateur
Direction du vent (°) ³⁶	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0° à 360°	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0° à 360°	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0° à 360°	Anémomètres à coupelles et à ultrasons: 0° à 360°	Anémomètres à coupelles: 0° à 360° Anémomètres à ultrasons: défini par l'utilisateur
* Un spectre de turbulences de Kaimal non isotropique avec échelle de longueur des turbulences de 350 m.					

³³ Un numéro de classe de 1 correspond à 1 % à 10 m/s, mais à plus de 1 % en dessous de 10 m/s et à moins de 1 % au-dessus de 10 m/s.

³⁴ Les plages des paramètres d'influence déterminées lors d'une mesure de la performance de puissance incluent des paramètres mesurés dans le cadre de la mesure de performance: vitesse du vent, turbulences, température de l'air, masse volumique de l'air. L'angle d'écoulement ascendant peut être déterminé lors d'un étalonnage du site en montant un anémomètre à ultrasons à deux girouettes ou tridimensionnel à la hauteur du moyeu sur le mât météorologique temporairement monté sur la fondation des éoliennes. L'angle d'écoulement ascendant sur l'éolienne peut être déterminé par un anémomètre sur le nez du rotor.

³⁵ Pour la génération de vent artificiel, voir par exemple l'Article J.4.

³⁶ Si un anémomètre à coupelles est sensible à la direction (il convient de le vérifier sur au moins un échantillon), la directivité doit être incluse dans la classification. Pour les anémomètres à ultrasons, la directivité doit toujours être incluse dans la classification, alors que pour la classe S, la plage de directions du vent peut être définie par l'utilisateur.

Pour les cinq échantillons d'anémomètres à l'essai pour la classification, la classe est déterminée par la moyenne des valeurs k plus la moitié de la plage divisée par $\sqrt{3}$, avec en prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire (voir Equation (I.3)).

$$k = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 k_n + \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{I.3})$$

Une classification qui fait référence à une classe donnée est exprimée par kA , kB ou kS , par exemple 1,7A ou 2,5S. L'incertitude-type des caractéristiques opérationnelles (voir Tableau D.1) d'un anémomètre à ultrasons ou d'un anémomètre à coupelles peut être déduite à partir de la classification en prenant pour hypothèse une distribution d'incertitude rectangulaire. Dans ce cas, l'incertitude-type à utiliser dans l'évaluation de l'incertitude de performance de puissance est:

$$u_{v2j} = (0,05 \text{ m/s} + 0,005 \cdot U_j) \cdot k \cdot \sqrt{3} \quad (\text{I.4})$$

Un exemple de classification est décrit à l'Annexe J.

I.5 Format de rapport

Les rapports de classification du capteur de vitesse du vent doivent spécifier toutes les informations pertinentes concernant le capteur, notamment l'ensemble des paramètres. La documentation de la classe d'un anémomètre à ultrasons doit spécifier la configuration programmée pour laquelle la classification est valide.

La documentation adéquate doit être fournie avec des informations détaillées sur les procédures suivies, les mesures réalisées dans le contexte de la classification, ainsi que la documentation des installations et des instruments utilisés.

Annexe J **(normative)**

Evaluation des anémomètres à coupelles et à ultrasons

J.1 Généralités

L'évaluation de l'anémométrie pour la classification doit être déduite à partir d'essais en soufflerie traçables, d'autres essais en laboratoire et de la modélisation associée de caractéristiques des anémomètres. Il convient d'inclure également des essais de vérification sur site dans une évaluation poussée.

L'évaluation d'un type d'anémomètre à ultrasons ou à coupelles doit comprendre des procédures vérifiées afin de déterminer l'influence des caractéristiques de base suivantes (noter aussi le Tableau I.1):

- caractéristiques de réponse de l'angle d'inclinaison;
- caractéristiques de réponse de l'angle d'orientation;
- effets induits par la température sur la performance de l'anémomètre.

Les caractéristiques suivantes doivent en outre être évaluées pour les anémomètres à coupelles:

- effets dynamiques dus aux caractéristiques de couple du rotor.

L'Article J.2 décrit les procédures de mesure des caractéristiques de l'anémomètre. L'Article J.3 décrit une méthode de classification des anémomètres à coupelles avec un exemple; l'Article J.4 décrit une méthode de classification des anémomètres à ultrasons. Une évaluation réelle doit être basée sur les méthodologies à l'Article J.3 et à l'Article J.4, mais pourrait également être basée sur d'autres méthodes d'évaluation, à condition qu'elles incluent des procédures vérifiées afin d'inclure l'influence des paramètres du Tableau I.1. L'Article J.5 présente une méthode de comparaison sur site des anémomètres.

J.2 Mesures des caractéristiques des anémomètres

J.2.1 Mesures des caractéristiques de réponse de l'angle d'inclinaison des anémomètres à coupelles dans une soufflerie

La réponse de l'angle d'inclinaison est la vitesse du vent mesurée aux angles d'écoulement inclinés par rapport à la vitesse du vent mesurée à l'écoulement non incliné. La réponse de l'angle d'inclinaison d'un anémomètre à coupelles doit être mesurée dans une soufflerie qui satisfait aux exigences décrites à l'Annexe F. Le fait que la hauteur de la soufflerie soit suffisante pour obtenir des caractéristiques de réponse d'inclinaison précises doit en outre être documenté.

Le comportement d'un anémomètre est fortement influencé par l'espace libre qui l'entoure, particulièrement en dessous et au-dessus de l'anémomètre. Il est important que le mécanisme d'inclinaison soit conçu de telle sorte que le centre du détecteur de l'anémomètre soit fixé, mais en mesure de tourner. La plaque de fond de la soufflerie doit en outre être fermée afin d'éviter tout effet défavorable lié à l'écoulement. Aucun mouvement de translation ne peut donc être effectué par le rotor; seule une inclinaison du plan du rotor a lieu.

La réponse de l'angle d'inclinaison peut être mesurée de deux manières différentes: par balayage ou à partir de positions fixes.

Il convient de déterminer la réponse de l'anémomètre à un écoulement de l'air incliné quasi statiquement avec l'aide d'un dispositif d'angle d'inclinaison automatique installé dans la

soufflerie. Pendant les mesures, l'anémomètre est lentement incliné dans un sens et dans l'autre avec une vitesse de balayage très lente (moins de $0,05^\circ/\text{s}$); l'influence sur les résultats de la vitesse angulaire peut alors être négligée. Les balayages ne peuvent être utilisés que si la vitesse du vent dans la soufflerie reste inférieure à 0,5 % de la vitesse du vent nominale pour tous les angles d'inclinaison.

A un écoulement non incliné, l'angle d'inclinaison doit être fixé et les mesures doivent être effectuées pendant 300 s afin de garantir que suffisamment de données sont collectées depuis la tranche zéro ($\pm 0,5^\circ$). Ces données de tranche zéro sont utilisées pour la normalisation de la réponse de l'angle d'inclinaison.

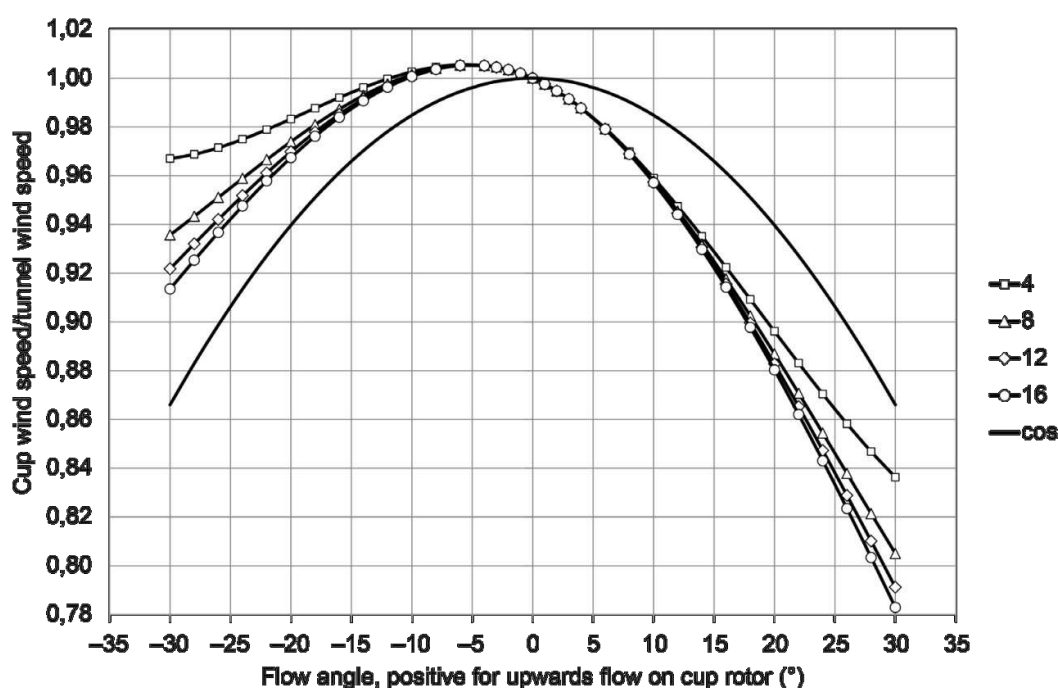
Les enregistrements de l'angle d'inclinaison, de la vitesse du vent dans la soufflerie et des résultats de l'anémomètre doivent être simultanés et moyennés. Il peut être utile d'intégrer une résolution plus fine de l'algorithme de moyennage de tranche afin de tenir compte de gradients plus élevés dans la réponse de l'angle d'inclinaison autour de zéro degré.

A défaut, il convient de déterminer la réponse de l'angle d'inclinaison par des mesures progressives de la position fixée, où la réponse à chaque angle est déterminée par l'étalonnage de la soufflerie de l'Annexe F à des vitesses du vent nominales choisies dans la plage de vitesses du vent.

Recommandations concernant la matrice de mesure:

- a) définition de l'angle d'écoulement: positif pour écoulement montant sur rotor à coupelles;
- b) étapes et plage d'angles d'inclinaison: au moins -30° à $+30^\circ$ (par exemple, $\pm 0^\circ$, $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$, $\pm 3^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$, $\pm 8^\circ \dots \pm 30^\circ$);
- c) étapes et plage de vitesses du vent: 4 m/s à 16 m/s (par exemple, 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s);
- d) plage de moyennage de tranche pour la méthode de balayage: largeur de tranche max 2° .

Un exemple de réponse de l'angle d'inclinaison (y compris la forme "idéale" de cosinus) est représenté à la Figure J.1.



IEC

Anglais	Français
Cup wind speed/tunnel wind speed	Vitesse du vent mesurée par un anémomètre à coupelles/Vitesse du vent dans la soufflerie
Flow angle, positive for upwards flow on cup rotor (deg)	Angle d'écoulement, positif pour écoulement ascendant sur un rotor à coupelles (°)

Figure J.1 – Réponse de l'angle d'inclinaison $V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$ d'un anémomètre à coupelles en fonction de l'angle d'écoulement α comparée à la réponse du cosinus

J.2.2 Mesures des caractéristiques directionnelles des anémomètres à coupelles dans une soufflerie

La conception de certains anémomètres à coupelles (par exemple une forme de logement asymétrique, des entrées de câbles asymétriques, etc.) peut avoir des effets défavorables sur le signal de vitesse du vent de l'anémomètre par rapport à la direction de l'écoulement horizontal et la direction de référence utilisée pour l'étalonnage (sensibilité de l'orientation). Cet effet n'est pas souhaité, car il ne peut pas généralement pas être corrigé. Il peut contribuer de façon substantielle à l'incertitude totale de la mesure de la vitesse du vent. Les mesures de sensibilité à l'orientation doivent être effectuées à des vitesses du vent de 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s.

J.2.3 Mesures des caractéristiques de couple du rotor de l'anémomètre à coupelles dans une soufflerie

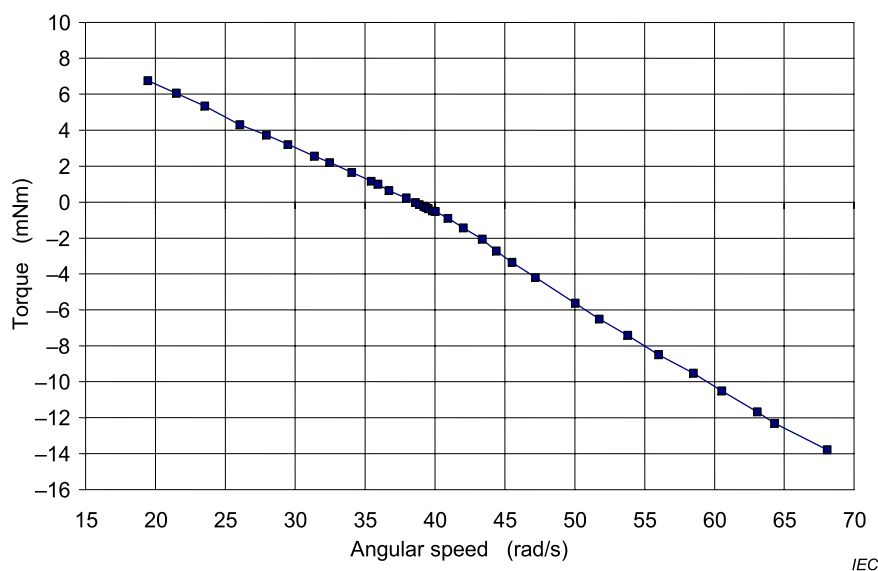
La réponse dynamique d'un anémomètre à coupelles est gouvernée par l'Equation (J.1), où I est le moment d'inertie de la masse, ω est la vitesse angulaire, t est la durée, Q_A est le couple aérodynamique du rotor et Q_F est le couple dû au frottement (principalement sur les paliers).

$$I \frac{dw}{dt} = Q_A - Q_F \quad (J.1)$$

Le couple net, $Q_A - Q_F$, sur le rotor de l'anémomètre à coupelles et donc les caractéristiques du couple du rotor peuvent être mesurés dans une soufflerie.

Le couple aérodynamique peut être mesuré en obligeant le rotor à tourner à des vitesses angulaires spécifiques en déséquilibre tout en mesurant le couple avec un capteur de couple.

Le couple aérodynamique du rotor de l'anémomètre à coupelles est égal au couple de réaction sur l'arbre, mesuré par le capteur de couple, moins le couple de frottement. Il convient que les mesures proches de la vitesse angulaire à l'équilibre soient très précises et détaillées. Un exemple de mesure du couple, dans lequel la vitesse de la soufflerie a été maintenue à un niveau constant de 8 m/s et où la vitesse de rotation du rotor a été soumise à des variations, est donné à la Figure J.2.



Anglais	Français
Torque (mNm)	Couple (mNm)
Angular speed (rad/s)	Vitesse angulaire (rad/s)

Figure J.2 – Mesures du couple $Q_A - Q_F$ dans une soufflerie en fonction de la vitesse angulaire ω d'un rotor d'anémomètre à coupelles à 8 m/s

J.2.4 Mesures des réponses échelonnées des anémomètres à coupelles dans une soufflerie

Les caractéristiques du couple du rotor peuvent également être mesurées avec une méthode de réponse échelonnée dans une soufflerie. Cette méthode est moins précise que celle décrite en J.2.3. En effet, les caractéristiques de couple linéaire des deux côtés du rapport de vitesse à l'équilibre (coefficient de couple égal à zéro, voir J.3.2) doivent faire l'objet d'une hypothèse.

Une réponse échelonnée est une méthode dans laquelle un anémomètre à coupelles, dans une soufflerie avec une vitesse d'écoulement constante, est forcé à une vitesse de rotation en déséquilibre, supérieure ou inférieure à la vitesse du vent à l'équilibre, la récupération de la vitesse angulaire à l'équilibre étant surveillée. La région de récupération proche de l'équilibre est la partie importante de la récupération. Il est recommandé d'utiliser les données de la région de récupération entre 50 % et 98 % de la vitesse du rotor à l'équilibre lors des essais d'accélération et entre 150 % et 102 % lors des essais de décélération lors de l'installation des lignes de coefficient de couple.

Pour forcer l'anémomètre à fonctionner en déséquilibre, la méthode peut consister à fixer un arbre intermédiaire sur le dessus du rotor de l'anémomètre à coupelles et à le raccorder à un moteur en le faisant passer par un trou à travers la cloison de la soufflerie. La vitesse de rotation est contrôlée par le moteur, qui est mécaniquement désengagé du rotor quand la mesure de l'accélération ou de la décélération doit commencer.

L'état de déséquilibre peut également être atteint en appliquant un ou plusieurs jets d'air comprimé d'un côté ou de l'autre du rotor de l'anémomètre à coupelles. Des précautions doivent toutefois être prises pour ne pas perturber le vent en amont dans la soufflerie.

Il convient que les états de départ en déséquilibre soient bien en dehors de la plage de rotations pour l'analyse (de 50 % à 150 % de la vitesse du rotor à l'équilibre), afin de garantir que le dispositif d'excitation n'influe pas sur les données utilisées pour l'installation.

Lorsque les caractéristiques du couple peuvent être exprimées par une relation linéaire d'un côté ou de l'autre de l'équilibre du couple (couple égal à zéro), la réponse échelonnée peut être exprimée par l'équation:

$$u(t) = u_t - \Delta u \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \quad (\text{J.2})$$

où

$u(t)$	est la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre à coupelles au moment t à l'aide de la fonction d'étalonnage ordinaire;
u_t	est la vitesse du vent dans la soufflerie;
Δu	est la différence entre la vitesse du vent dans la soufflerie et la vitesse du vent indiquée par l'anémomètre à coupelles, au début de la mesure de la réponse échelonnée, à l'instant t_0 ;
t	est le temps;
τ	est la constante de temps à déterminer pour la réponse échelonnée (τ_{low} pour la réponse échelonnée du dessous et τ_{high} pour la réponse échelonnée du dessus).

Lors de l'installation des données dans les deux constantes inconnues τ et t_0 , il est utile de reformuler l'Equation (J.2) et d'utiliser la régression linéaire pour déterminer la constante de temps τ :

$$\ln\left(\frac{u_t - u(t)}{\Delta u}\right) = -\frac{t - t_0}{\tau} \quad (\text{J.3})$$

Un exemple d'utilisation des résultats de la méthode de réponse échelonnée pour déterminer le couple linéaire des constantes de temps est décrit de manière plus approfondie en J.3.2.

J.2.5 Mesures des effets induits de la température sur la performance de l'anémomètre

Les effets induits par la température qui influent sur la performance de l'anémomètre doivent être évalués.

J.2.5.1 Mesure du couple de frottement dans un anémomètre à coupelles

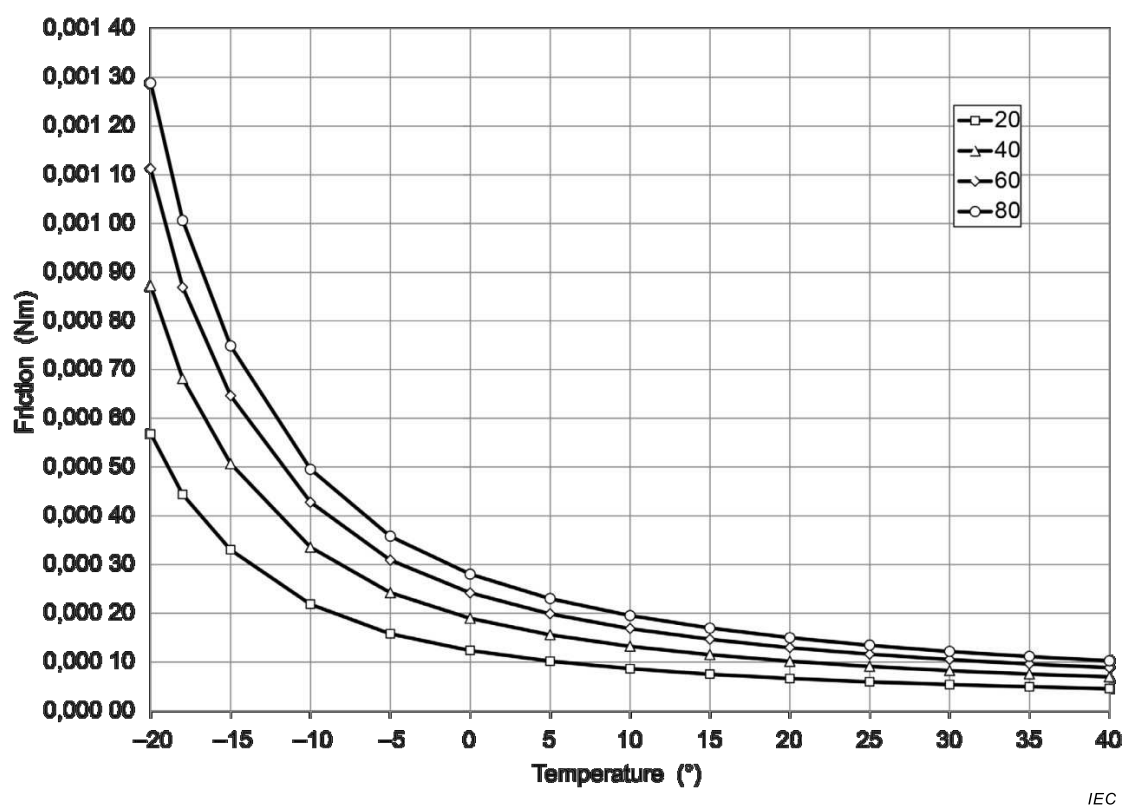
Les effets dépendants de la température et dus au frottement des paliers doivent être évalués par un essai du volant d'inertie dans une chambre climatique [11].

Les mesures du couple de frottement doivent être faites en remplaçant le rotor de l'anémomètre à coupelles par un volant d'inertie et en mesurant la décélération d'une vitesse de rotation qui correspond à 20 m/s. Deux couples agissent sur le rotor: le couple de

frottement des paliers ³⁷ et le couple de frottement de l'air sur le volant d'inertie (qui doit être soustrait du couple mesuré). Les essais doivent être effectués à des températures comprises entre – 20 °C et + 40 °C au moins avec des graduations de 5 °C. Pour chaque température, le frottement peut être exprimé sous la forme d'un polynôme de deuxième ordre avec trois constantes, F_0 , F_1 et F_2 .

$$Q_F = F_0 + F_1 \omega + F_2 \omega^2 \quad (\text{J.4})$$

La Figure J.3 montre un exemple de couple de frottement des paliers en fonction de la température pour les vitesses de rotation fixes.



IEC

Anglais	Français
Friction (Nm)	Frottement (Nm)
Temperature (°C)	Température (°C)

Figure J.3 – Exemple de couple de frottement des paliers Q_F en fonction de la température pour une plage de vitesses angulaires ω

J.2.5.2 Essais de soufflerie à différentes températures et vitesses du vent

L'influence des effets de la température sur un anémomètre entier (que ce soit un anémomètre à coupelles ou un anémomètre à ultrasons) peut être vérifiée à l'aide d'essais en souffleries climatiques. Les essais peuvent être effectués à des températures conformes au Tableau I.1, comprises entre –20 °C et + 40 °C avec des graduations de 5 °C. Les essais peuvent être effectués à des vitesses de 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s. Les écarts de la vitesse du vent par rapport à l'étalonnage normal de l'anémomètre peuvent alors être déterminés. Des précautions doivent être prises pour garantir que les conclusions des essais

³⁷ Le couple de frottement peut être dû à autre chose que le frottement des paliers, par exemple à la génération d'un signal. Un tel couple doit être inclus dans les mesures de couple de frottement.

en soufflerie ne sont pas biaisées par des effets non souhaités (p. ex.: par l'accumulation de givre sur le rotor de l'anémomètre). Il convient de comparer les résultats aux valeurs simulées calculées avec le modèle d'anémomètre à coupelles en J.3.2.

J.2.6 Mesures des caractéristiques directionnelles des anémomètres à ultrasons dans une soufflerie

L'influence directionnelle de la sortie des anémomètres à ultrasons doit être mesurée dans une soufflerie qui satisfait aux exigences décrites à l'Annexe F.

La réponse de l'anémomètre à un écoulement de l'air incliné et/ou orienté quasi statiquement doit être déterminée avec l'aide d'un dispositif d'angle d'inclinaison et d'orientation installé dans la soufflerie. Lors des mesures, l'anémomètre est positionné avec un angle d'inclinaison fixe. La direction d'orientation peut être spécifiée pour les emplacements d'orientation fixes avec des mesures pour des moyennes de 30 s ou peut être orientée de façon continue avec une vitesse de balayage d'environ $1^\circ/\text{s}$ ³⁸. L'orientation doit être effectuée pour le secteur de mesure prédéfini de l'anémomètre à ultrasons. L'angle d'inclinaison de l'anémomètre à ultrasons doit être fixé pour les angles d'inclinaison suivants: 0° , $\pm 2^\circ$, $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$. Il convient d'ajouter ou d'omettre les angles d'inclinaison s'il est évident qu'ils sont nécessaires ou qu'ils sont inutiles. Les mesures doivent être effectuées pour les vitesses du vent suivantes: 4 m/s, 8 m/s, 12 m/s et 16 m/s. Pour chaque direction, l'écart entre la vitesse du vent indiquée par l'anémomètre à ultrasons et l'étalonnage ordinaire à la direction de référence doit être déduit.

J.3 Méthode de classification des anémomètres à coupelles basée sur les essais en soufflerie et en laboratoire et sur la modélisation de l'anémomètre à coupelles

J.3.1 Méthode

La méthode de classification doit utiliser un modèle d'anémomètre à coupelles approprié pour déterminer les écarts dus aux paramètres d'influence, conformément au Tableau I.1. Il doit être vérifié que le modèle d'anémomètre à coupelles est en mesure d'inclure correctement tous les paramètres d'influence. La méthode doit être basée sur les mesures en soufflerie et en laboratoire décrites à l'Article J.2. La méthode doit en outre utiliser un générateur de vent artificiel afin de générer des données de vent d'entrée de domaine de temps tridimensionnel pour le modèle d'anémomètre à coupelles. Les écarts ε_i doivent être déterminés à partir des différences entre les moyennes d'entrée de vitesse horizontale du vent sur 10 min du générateur de vent artificiel et les moyennes de réponse du modèle d'anémomètre à coupelles sur 10 min.

J.3.2 Exemple de modèle d'anémomètre à coupelles

J.3.2.1 Généralités

Le modèle d'anémomètre à coupelles donné en exemple est un modèle physique qui simule la réponse de l'anémomètre à coupelles dans le temps; voir références [7] et [8]. Certaines propriétés physiques de l'anémomètre à coupelles doivent être mesurées et utilisées tout au long de l'évaluation. Il s'agit de l'inertie I du rotor, de la surface frontale d'une coupelle A et du rayon R entre le centre de l'arbre et le centre des coupelles.

La réponse de l'anémomètre à coupelles au vent tridimensionnel doit être déduite à partir d'une équation différentielle à l'équilibre du couple, où le couple sur le rotor est égal au couple aérodynamique moins le couple de frottement (côté droit de l'équation) (voir Equation (J.1)).

³⁸ L'utilisation de directions d'orientation fixes améliore la précision de la mesure, alors que l'utilisation d'une vitesse de balayage lente est un avantage pour révéler le détail des variations susceptibles de se produire.

La vitesse angulaire de l'anémomètre à coupelles ω est trouvée à partir de l'équation différentielle. La réponse du couple aérodynamique et des couples de frottement dus aux variations de vent est déterminée à l'aide des valeurs d'étalonnage de la soufflerie. Le couple aérodynamique Q_A est fonction du vecteur de vent instantané $\vec{U} = \{u, v, w\}$ déterminé par le générateur de vent artificiel. L'angle d'écoulement ascendant et le scalaire du vecteur de vent sont déterminés à partir du vecteur de vent:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) \quad (\text{J.5})$$

$$|\vec{U}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (\text{J.6})$$

Une vitesse horizontale du vent équivalente est trouvée en multipliant le scalaire du vecteur de vent par la réponse angulaire mesurée dans la soufflerie pour l'angle d'écoulement ascendant instantané:

$$U_{eq} = F_\alpha\left(\alpha, |\vec{U}|\right) \cdot |\vec{U}| \quad (\text{J.7})$$

Ici, $F_\alpha(\alpha, |\vec{U}|)$ est la réponse de l'angle d'inclinaison de l'anémomètre à coupelles, comme indiqué à la Figure J.1.

Le couple aérodynamique peut être exprimé par une courbe de couple généralisé dont la validité a été vérifiée pour toutes les vitesses du vent et toutes les vitesses de rotation [11]:

$$Q_A = \frac{1}{2} \rho A R U_{eq}^2 C_{QA}(\lambda) \quad (\text{J.8})$$

où

ρ est la masse volumique de l'air;

A est la surface d'une coupelle;

R est le rayon d'une coupelle;

U_{eq} est la vitesse horizontale du vent équivalente;

C_{QA} est le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor.

Le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor est déduit à partir des mesures de couple de soufflerie en J.2.3 ou en J.2.4, où U_{eq} dans ce cas est remplacé par la vitesse du vent dans la soufflerie:

$$C_{QA} = C_{QA}(\lambda) = \frac{Q_Q}{\frac{1}{2} \rho A R U_{eq}^2} \quad (\text{J.9})$$

Le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor est fonction du rapport de vitesse:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_{eq} - U_t} \quad (J.10)$$

où

U_t est un seuil de vitesse du vent (dédit comme le reste du décalage de l'étalonnage après soustraction de l'influence du frottement; si le frottement est égal à zéro, le seuil de vitesse du vent est égal au décalage de l'étalonnage).

Lorsque le coefficient de couple du rotor peut être caractérisé par deux courbes linéaires des deux côtés du couple à l'équilibre, deux constantes de temps correspondantes peuvent être déterminées par les mesures de réponse échelonnée de la soufflerie (voir J.2.4 et [9]). Les caractéristiques de couple linéaire peuvent alors être déterminées à partir des valeurs de τ , pour les rapports de vent bas et élevé respectivement, de l'équation:

$$K = - \frac{2I(u_0 + \Delta u - U_t)}{\rho A R^2 (u_0 + \Delta u)^2 \tau} \quad (J.11)$$

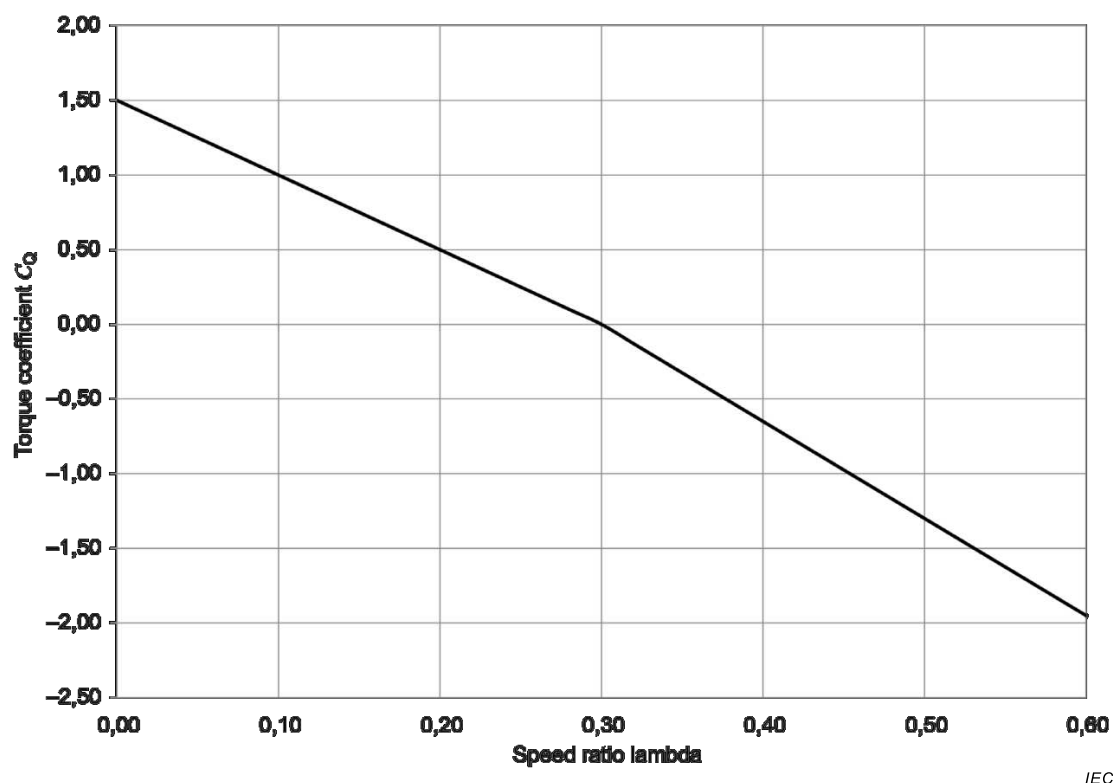
Le coefficient de couple aérodynamique généralisé du rotor peut être exprimé par:

$$\text{pour } \lambda \leq \lambda_0 : C_{QA} = K_{low} (\lambda - \lambda_0) \text{ et pour } \lambda > \lambda_0 : C_{QA} = K_{high} (\lambda - \lambda_0) \quad (J.12)$$

où

λ_0 est le rapport de vitesse pour $C_{QA} = 0$.

Un exemple de coefficient de couple du rotor est donné à la Figure J.4.



Anglais	Français
Torque coefficient C_Q	Coefficient de couple C_Q
Speed ratio lambda	Rapport de vitesses lambda

Figure J.4 – Exemple de coefficient de couple du rotor C_{QA} en fonction du rapport de vitesse λ déduit à partir des réponses échelonnées avec K_{low} égal à $-5,5$ et K_{high} égal à $-6,5$

Le couple de frottement est fonction de la température et de la vitesse de rotation, issue des mesures de frottement en J.2.5.1:

$$Q_F = Q_F(T, \omega) \quad (J.13)$$

J.3.2.2 Variations de la plage de paramètres d'influence et exemple de détermination de classe

Les plages des paramètres d'influence doivent être variées à l'aide d'un modèle de turbulences qui génère des chronogrammes tridimensionnels artificiels de la vitesse du vent sur des périodes de 10 min avec un échantillon de vitesse d'au moins 10 Hz. En exposant le modèle d'anémomètre à coupelles à ces vents artificiels, les réponses de l'anémomètre à coupelles sont déduites et les écarts par rapport à la vitesse horizontale des vents artificiels sont trouvés. Les écarts pour toutes les combinaisons de plages des paramètres d'influence peuvent être déduits à l'aide de la méthode de Monte-Carlo. Les écarts déterminent la classe comme exprimé dans l'Equation (I.1). Un exemple de classification d'un anémomètre à coupelles est donné à la Figure J.5; les caractéristiques sont représentées à la Figure J.3 et à la Figure J.4; et les données sont répertoriées au Tableau J.1 et au Tableau J.2. D'autres données relatives à la classification sont disponibles dans le Tableau J.3.

Les écarts de tous les paramètres d'influence pour les classes A, B, C et D sont indiqués à la Figure J.5 et à la Figure J.6. Les classes qui en résultent sont 1,69A, 6,56B, 8,01C et 9,94D. L'anémomètre à coupelles de classe 1,69A satisfait donc aux exigences de 1,70A pour une utilisation sur un terrain qui satisfait aux exigences de l'Annexe B et sur un terrain de type A en C.3.1 pour les températures supérieures à 0 °C, mais pas pour les températures inférieures à 0 °C avec la classe 8,01C. L'anémomètre à coupelles ne satisfait pas aux exigences recommandées de la classe 2.5B ou 2.5D pour un terrain qui ne satisfait pas aux exigences de l'Annexe B.

Tableau J.1 – Réponse de l'angle d'inclinaison de l'exemple d'anémomètre à coupelles

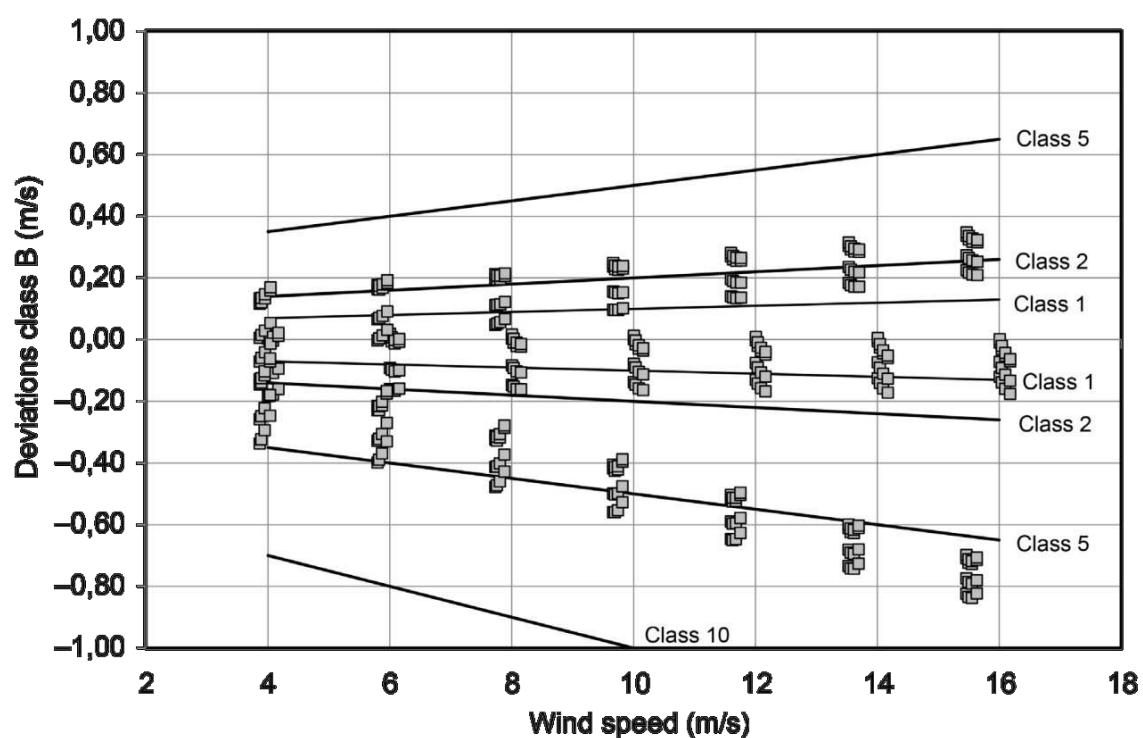
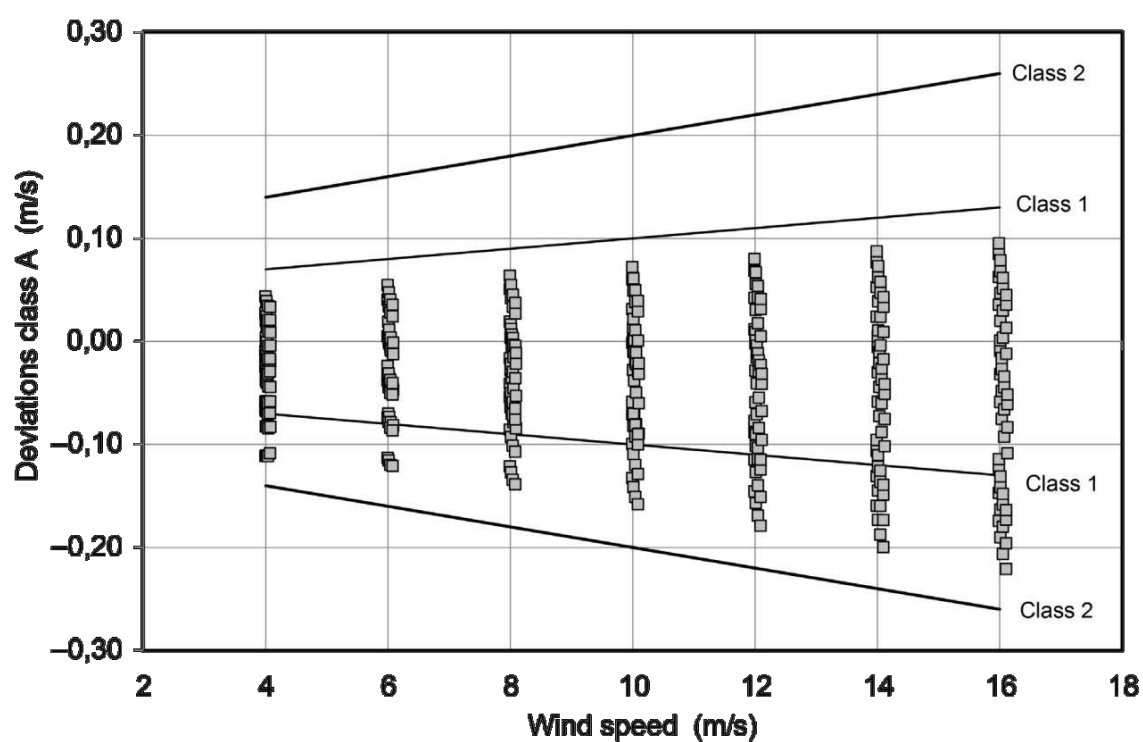
Wsp V (m/s)	4	8	12	16
Angle α (°)	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$	$V_{\alpha}/V_{\alpha=0}$
–30	0,967 005	0,935 689	0,921 815	0,913 545
–28	0,968 769	0,943 307	0,932 028	0,925 304
–26	0,971 484	0,951 098	0,942 067	0,936 683
–24	0,974 941	0,958 908	0,951 805	0,947 569
–22	0,978 933	0,966 583	0,961 111	0,957 850
–20	0,983 253	0,973 974	0,969 863	0,967 413
–18	0,987 695	0,980 930	0,977 934	0,976 148
–16	0,992 055	0,987 304	0,985 199	0,983 945
–14	0,996 131	0,992 948	0,991 538	0,990 698
–12	0,999 722	0,997 717	0,996 829	0,996 301
–10	1,002 628	1,001 468	1,000 954	1,000 648
–8	1,004 651	1,004 057	1,003 793	1,003 637
–6	1,005 594	1,005 344	1,005 233	1,005 166
–4	1,005 262	1,005 188	1,005 155	1,005 136
–3	1,004 558	1,004 526	1,004 513	1,004 505
–2	1,003 462	1,003 452	1,003 448	1,003 446
–1	1,001 951	1,001 950	1,001 949	1,001 949
0	1,000 000	1,000 000	1,000 000	1,000 000
1	0,997 595	0,997 594	0,997 593	0,997 593
2	0,994 750	0,994 740	0,994 736	0,994 734
3	0,991 490	0,991 458	0,991 445	0,991 437
4	0,987 838	0,987 764	0,987 731	0,987 712
6	0,979 458	0,979 208	0,979 097	0,979 030
8	0,969 803	0,969 209	0,968 945	0,968 789
10	0,959 068	0,957 908	0,957 394	0,957 088
12	0,947 450	0,945 445	0,944 557	0,944 029
14	0,935 147	0,931 964	0,930 554	0,929 714
16	0,922 359	0,917 608	0,915 503	0,914 249
18	0,909 287	0,902 522	0,899 526	0,897 740
20	0,896 133	0,886 854	0,882 743	0,880 293
22	0,883 101	0,870 751	0,865 279	0,862 018
24	0,870 397	0,854 364	0,847 261	0,843 025
26	0,858 228	0,837 842	0,828 811	0,823 427
28	0,846 801	0,821 339	0,810 060	0,803 336
30	0,836 325	0,805 009	0,791 135	0,782 865

Tableau J.2 – Coefficients de frottement de l'exemple d'anémomètre à coupelles

Temp	F0	F1	F2
(°C)	(Nm)	(Nms)	(Nms ²)
–20	2,000E-04	2,000E-05	–8,000E-08
–18	1,563E-04	1,563E-05	–5,714E-08
–15	1,163E-04	1,163E-05	–4,000E-08
–10	7,692E-05	7,692E-06	–3,077E-08
–5	5,556E-05	5,556E-06	–2,222E-08
0	4,348E-05	4,348E-06	–1,739E-08
5	3,571E-05	3,571E-06	–1,429E-08
10	3,030E-05	3,030E-06	–1,212E-08
15	2,632E-05	2,632E-06	–1,053E-08
20	2,326E-05	2,326E-06	–9,302E-09
25	2,083E-05	2,083E-06	–8,333E-09
30	1,887E-05	1,887E-06	–7,547E-09
35	1,724E-05	1,724E-06	–6,897E-09
40	1,587E-05	1,587E-06	–6,349E-09

Tableau J.3 – Données diverses relatives à la classification de l'exemple d'anémomètre à coupelles

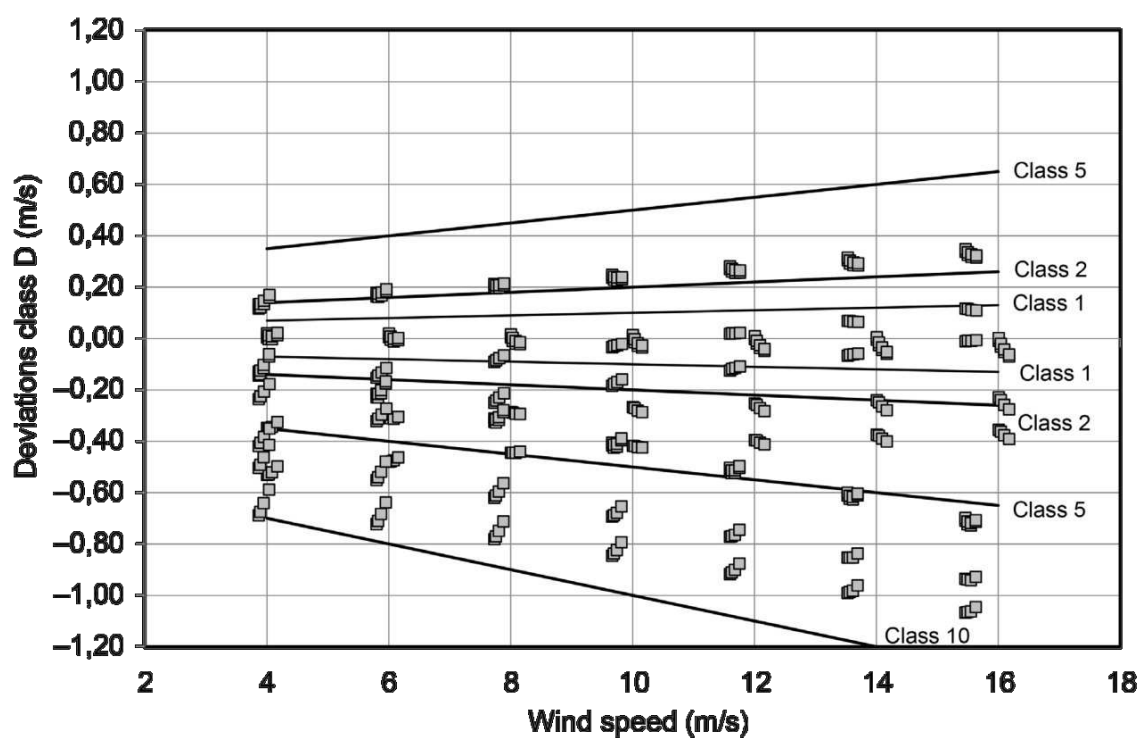
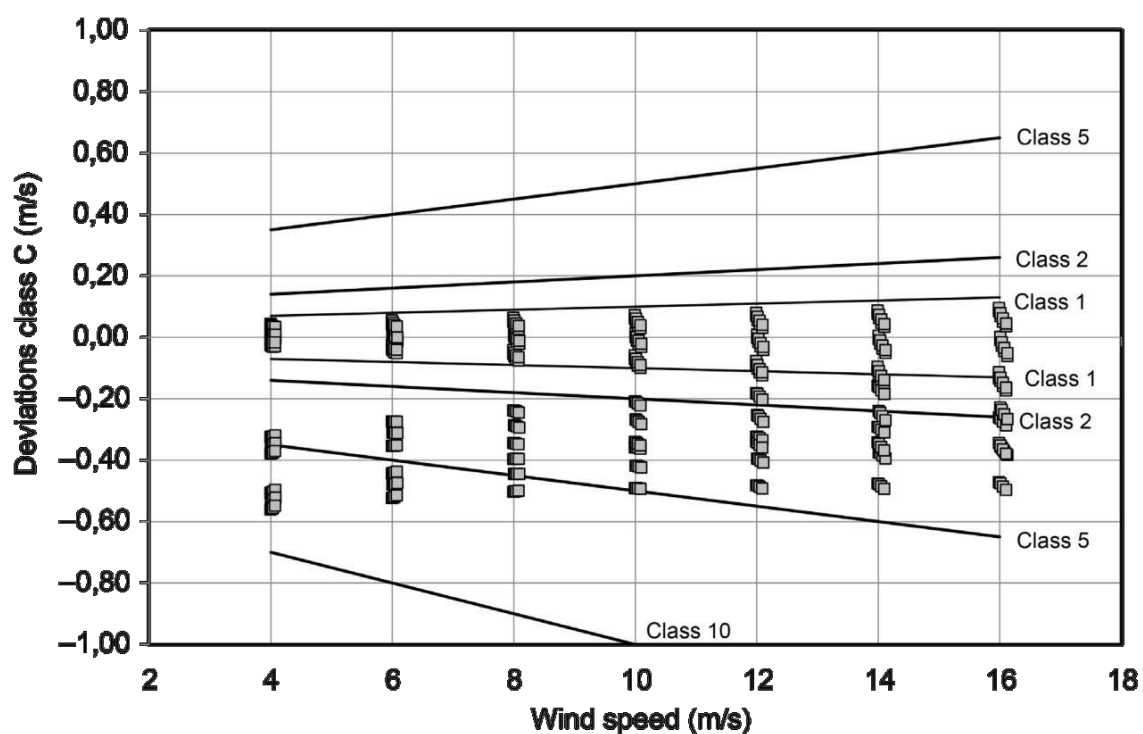
Diamètre de la coupelle	75 mm
Surface de la coupelle A	0,004 417 87 m ²
Rayon au centre de la coupelle R	65 mm
Inertie I du rotor	0,000 2 kgm ²
Rapport de vitesse à l'équilibre λ_0	0,3
Température d'étalonnage	20 °C
Pression atmosphérique d'étalonnage	1 013 hPa
Masse volumique de l'air d'étalonnage ρ	1,203 821 kg/m ³
Intensité des turbulences d'étalonnage	0,003
Structure des turbulences d'étalonnage	$\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w = 1/1/1$ isotropique
Coefficients d'étalonnage A et B	0,679 55 et 0,258 70
Coefficients de frottement d'étalonnage F_0 , F_1 et F_2 à 20 °C	voir Tableau J.3 pour 20 °C
Pentes de coefficient de couple K_{low} et K_{high}	–5,0 et –6,5



IEC

Anglais	Français
Deviations class A (m/s)	Classe d'écarts A (m/s)
Deviations class B (m/s)	Classe d'écarts B (m/s)
Wind speed (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
Class 1	Classe 1
Class 2	Classe 2
Class 5	Classe 5
Class 10	Classe 10

Figure J.5 – Ecarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 1,69A (image du haut) et une classe 6,56B (image du bas)



IEC

Anglais	Français
Deviations class C (m/s)	Classe d'écarts A (m/s)
Deviations class D (m/s)	Classe d'écarts B (m/s)
Wind speed (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
Class 1	Classe 1
Class 2	Classe 2
Class 5	Classe 5
Class 10	Classe 10

Figure J.6 – Ecarts de classification d'un exemple d'anémomètre à coupelles présentant une classe 8,01C (image du haut) et une classe 9,94D (image du bas)

J.4 Méthode de classification d'anémomètre à ultrasons basée sur les essais en soufflerie et sur la modélisation de l'anémomètre à ultrasons

La méthode de classification utilise un modèle d'anémomètre à ultrasons approprié pour déterminer les écarts dus aux paramètres d'influence. La méthode est basée sur les mesures en soufflerie et en laboratoire décrites en J.2.6 et en J.2.5.2. La méthode de classification de l'anémomètre à ultrasons utilise en outre un générateur de vent artificiel similaire à celui du modèle de l'anémomètre à coupelles, afin de générer des données de vent d'entrée de domaine de temps tridimensionnel pour le modèle d'anémomètre à ultrasons; voir J.3.2.

La réponse de l'anémomètre à ultrasons est fonction du vecteur de vent instantané $\vec{U} = \{u, v, w\}$ déterminé par le générateur de vent artificiel. L'angle d'écoulement ascendant et le scalaire du vecteur de vent sont déterminés à partir du vecteur de vent par les Equations (J.5) et (J.6). La réponse est ensuite déterminée par l'interpolation dans les données mesurées dans une soufflerie:

$$U_{\text{sonic}} = F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|) \cdot |\vec{U}| \quad (\text{J.14})$$

où

$F_{\alpha,\gamma}(\alpha, \gamma, |\vec{U}|)$ est fonction de réponse d'inclinaison et d'orientation pour l'anémomètre à ultrasons.

Les écarts sont déterminés à partir des différences entre les réponses du modèle d'anémomètre à ultrasons et les moyennes des données du vent artificiel; voir J.3.2.2. Les paramètres d'influence pertinents sont les réponses des angles d'inclinaison et d'orientation, ainsi que les effets induits par la température.

J.5 Mesures de comparaison sur site libre

Dans une mesure de comparaison sur site libre, deux anémomètres peuvent être comparés. La mesure de comparaison peut être utilisée pour vérifier que les méthodes utilisées dans la classification des instruments sont cohérentes. Voir les Articles J.3 et J.4. La comparaison entre les anémomètres exige que les deux anémomètres soient étalonnés dans la même soufflerie. Il convient de configurer le site conformément aux procédures de montage pour deux anémomètres montés en tête de mât, comme décrit à l'Annexe G, avec une distance maximale entre eux. Un anémomètre à ultrasons 3D (étalonné U, V et W) doit être monté sur une flèche en dessous des deux capteurs pour mesurer les plages des paramètres d'influence environnementaux (angle d'écoulement, turbulences, spectre des turbulences) pour une analyse de classification de campagne de mesure de classe S. La température de l'air doit en outre être mesurée sur la même flèche pour déterminer la plage de températures et la pression atmosphérique doit être mesurée pour déterminer la plage de masses volumiques de l'air. Les traces temporelles de l'anémomètre à ultrasons 3D doivent être enregistrées, alors que des mesures moyennes sur 10 min dans un secteur relativement réduit et perpendiculaire à la flèche sont acceptables pour les deux anémomètres en cours de comparaison. Une base de données acceptable (au moins 180 h) doit être collectée pour une plage de vitesses du vent de 4 m/s à 16 m/s et une plage d'intensités des turbulences (par exemple, de 0,04 à 0,14). Afin de comparer deux anémomètres, il convient alors de dériver une classification de classe S des deux anémomètres des essais en laboratoire, puis de les comparer aux mesures sur site.

Annexe K (normative)

Comparaison in situ des anémomètres

K.1 Généralités

Il doit être prouvé que l'étalonnage d'un anémomètre utilisé pour les mesures de performance de puissance ne varie pas pendant toute la période de mesure. L'anémomètre peut être étalonné dans une soufflerie après la période de mesure pour indiquer les différences d'étalonnage avant la période de mesure. Une autre méthode consiste à comparer in situ l'anémomètre primaire à un anémomètre de commande installé à proximité pendant la période de mesure. Il convient de noter que cette méthode n'identifie pas une dégradation graduelle de l'étalonnage de l'anémomètre si l'anémomètre de commande se dégrade à un rythme similaire. Il convient de répéter régulièrement la comparaison in situ pour identifier les problèmes le plus tôt possible.

K.2 Conditions préalables

Pendant la période de mesure, les deux anémomètres sont installés sur le mât météorologique conformément à l'Annexe G. L'anémomètre primaire est utilisé pour mesurer la performance de puissance. L'autre est l'anémomètre de commande; il est utilisé pour la comparaison in situ. Les anémomètres peuvent être installés en trois variantes:

- a) variante 1: montage en tête de mât conformément à l'Article G.2;
- b) variante 2: autre montage en tête de mât conformément à l'Article G.3;
- c) variante 3: les deux anémomètres montés latéralement, conformément à l'Article G.4.

K.3 Méthode d'analyse

Deux bases de données seront comparées à l'aide des valeurs moyennes sur 10 min enregistrées lors de la période de mesure de la performance de puissance. La première base de données inclut des données qui commencent directement après l'installation des anémomètres. La deuxième base de données inclut des données pour la dernière partie de la période de mesure de la performance de puissance. Chaque base de données doit satisfaire aux exigences suivantes:

- a) la plage couverte est comprise entre 4 m/s et 12 m/s;
- b) les directions du vent doivent être dans le bon secteur de mesure;
- c) chaque tranche de vitesse du vent doit avoir au moins 3 points de données. Il existe deux possibilités de répartition en tranches des données:
 - 1) Option de répartition en tranches 1: des tranches de vitesse du vent d'une largeur de 1 m/s, centrées sur des valeurs de 1,0 m/s, basées sur la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande d'une tranche de direction du vent inférieure ou égale à $\pm 15^\circ$.
 - 2) Option de répartition en tranches 2: des tranches de vitesse du vent d'une largeur de 4 m/s centrées sur des valeurs de 2 m/s, 6 m/s, 10 m/s et 14 m/s³⁹, basées sur la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande et des tranches de direction du vent de 10° .

³⁹ Il est à noter que cette plage de vitesses du vent de 0 m/s à 16 m/s est réservée à cette étape d'analyse intermédiaire et que l'analyse finale doit être basée sur la plage de 4 m/s à 12 m/s.

- d) inclure un secteur de direction du vent au mât météorologique libre de tout sillage d'une éolienne et aux anémomètres libres de tout sillage du mât météorologique comme suit:
- 1) En cas de montage côte à côte des anémomètres (variante 2) et en n'utilisant la répartition en tranches de la vitesse du vent que pour un seul secteur de direction du vent (option de répartition en tranches 1), il convient que le secteur de direction du vent inclue la direction du vent à 90° de la direction de la flèche et dans des directions du vent acceptables;
 - 2) Dans le cas d'un anémomètre monté en tête de mât (variante 1), les tranches de direction du vent doivent être en dehors du sillage du mât météorologique. Les lignes de connexion horizontales (voir Figure K.1 et Figure K.2) entre le centre de l'anémomètre de commande et n'importe quelle partie du mât météorologique doivent avoir une distance angulaire minimale de 45° par rapport aux bords des tranches.
- e) la durée maximale doit être de 8 semaines.

Les tranches de direction du vent utilisées pour l'analyse doivent être clairement indiquées dans le rapport.

Si des tranches de vitesse du vent de 1 m/s et une tranche de direction du vent de 30° (option de répartition en tranches 1) sont appliquées, une régression linéaire est effectuée, l'anémomètre primaire étant la variable dépendante et l'anémomètre de commande étant la variable indépendante. Cette régression sera utilisée pour calculer la vitesse du vent de l'anémomètre primaire, appelée $V_{\text{primary\_est}}$.

$$V_{\text{primary\_est}} = m \cdot V_{\text{control}} + b \quad (\text{K.1})$$

où

m est la pente de la régression liant V_{control} et $V_{\text{primary\_est}}$;

b est le décalage de la régression liant V_{control} et $V_{\text{primary\_est}}$;

V_{control} est la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de commande.

L'objectif est de montrer une évolution du comportement d'un anémomètre dans le temps, et non un étalonnage absolu.

Si des tranches de vitesse du vent de 4 m/s et des tranches de direction du vent de 10° (option de répartition en tranches 2) sont appliquées, une interpolation linéaire par morceaux entre les tranches de vitesse du vent dans chaque tranche de direction du vent de la première base de données peut être utilisée pour estimer la vitesse du vent de l'anémomètre primaire en fonction de:

$$V_{\text{primary\_est}} = \frac{V_{\text{primary},i} - V_{\text{primary},i-1}}{V_{\text{control},i} - V_{\text{control},i-1}} (V_{\text{control}} - V_{\text{control},i-1}) + V_{\text{primary},i-1} \quad (\text{K.2})$$

Dans ce cas, seules les données de l'anémomètre de commande dans les tranches de vitesse du vent couvertes par la première base de données dans chaque tranche de direction du vent doivent être utilisées pour l'évaluation de la comparaison in situ dans la deuxième base de données. L'Equation (K.2) peut être utilisée pour l'extrapolation jusqu'aux limites des tranches de vitesse du vent couvertes. Si une seule tranche de vitesse du vent est couverte dans une tranche de direction du vent, le rapport des moyennes de la tranche des vitesses du vent mesurées par l'anémomètre primaire et par l'anémomètre de commande doit servir de facteur de correction pour la mesure de l'anémomètre de commande.

K.4 Critères d'évaluation

Appliquer la régression ou les interpolations linéaires par morceaux de la première base de données vers les mesures de l'anémomètre de commande de la deuxième base de données dans une vitesse du vent estimée par l'anémomètre primaire pour chaque période de 10 min.

Calculer la moyenne des différences (écart systématique) dans la vitesse du vent mesurée et estimée de l'anémomètre primaire pour des tranches de vitesse du vent larges de 1 m/s centrées autour de valeurs de 1 m/s. L'écart systématique est:

$$\gamma = \frac{\sum (V_{\text{primary\_est}} - V_{\text{primary}})}{n} \quad (\text{K.3})$$

Calculer l'incertitude-type des différences entre les vitesses du vent (écart statistique) mesurée et estimée par l'anémomètre primaire pour chaque tranche de vitesse du vent. L'incertitude-type des différences de vitesse du vent est l'écart-type des différences de vitesse du vent divisé par la racine carrée du nombre de points de données mesurés. L'incertitude-type est:

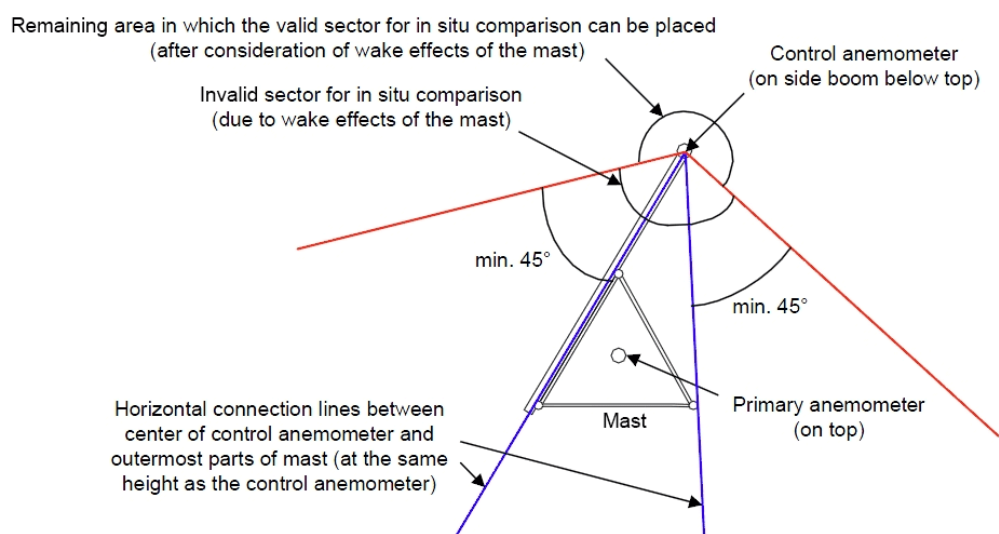
$$\sigma = \frac{\text{stdev}(\gamma)}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V_{\text{primary\_est}} - V_{\text{primary}})^2}{n}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{K.4})$$

Si le carré de la somme racine de la moyenne des différences (écart systématique) et l'incertitude-type des différences de vitesse du vent (écart statistique) ne dépasse pas 0,1 m/s dans une tranche entre 4 m/s et 12 m/s, l'essai in situ est réussi

$$\delta = \sqrt{\gamma^2 + \sigma^2} < 0,1 \text{ m/s} \quad (\text{K.5})$$

Si la valeur δ est supérieure à 0,1 m/s dans au moins une tranche et ne dépasse pas 0,2 m/s dans toutes les tranches entre 4 m/s et 12 m/s, l'incertitude de l'étalonnage de l'anémomètre $u_{V1,I}$ doit être augmenté au moins jusqu'à la valeur maximale de δ dans la plage de vitesses du vent de 4 m/s à 12 m/s. Si la valeur δ est supérieure à 0,2 m/s dans une tranche entre 4 m/s et 12 m/s, il convient de déplacer l'essai in situ à une période antérieure jusqu'à ce que δ ne dépasse plus 0,2 m/s. Les données de la courbe de puissance après cette période doivent être rejetées. L'incertitude de l'étalonnage de l'anémomètre $u_{V1,I}$ des données de la courbe de puissance restante doit être traitée, comme en cas d'absence de rejet des données.

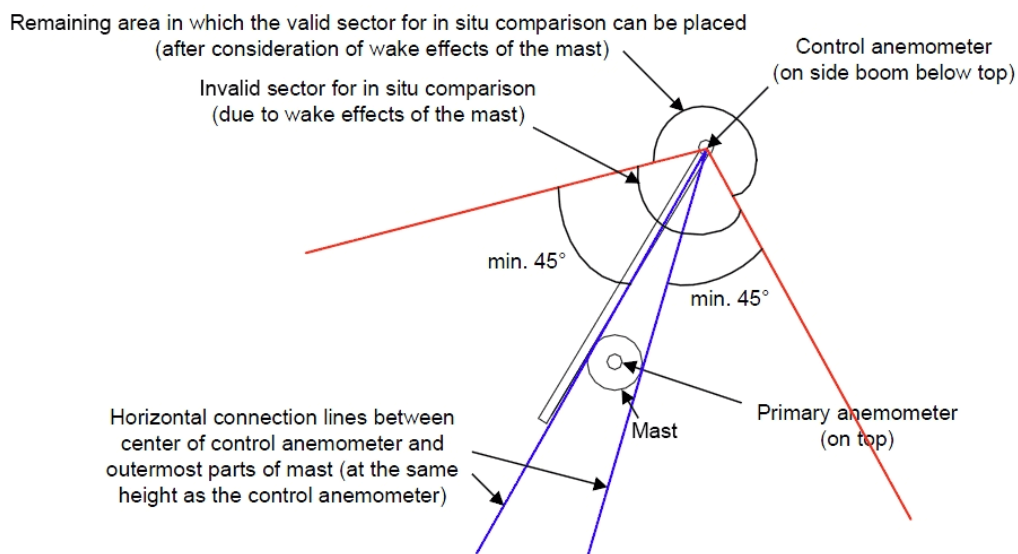
NOTE L'essai in situ peut être répété plusieurs fois lors de la campagne de mesure pour aider à identifier toute dégradation intermittente de l'anémomètre.



IEC

Anglais	Français
Remaining area in which the valid sector for in situ comparison can be placed (after consideration of wake effects of the mast)	Surface restante dans laquelle peut être placé le secteur valide pour la comparaison in situ (après étude des effets de sillage du mât)
Control anemometer (on side boom below top)	Anémomètre de commande (sur la flèche latérale en dessous de la tête)
Invalid sector for in situ comparison (due to wake effects of the mast)	Secteur non valide pour la comparaison in situ (en raison des effets de sillage du mât)
Min. 45°	45° au minimum
Min. 45°	45° au minimum
Horizontal connecting lines between center of control anemometer and outermost parts of mast (at the same height as the control anemometer)	Lignes de connexion horizontales entre le centre de l'anémomètre de commande et les parties les plus externes du mât (à la même hauteur que l'anémomètre de commande)
Mast	Mât
Primary anemometer (on top)	Anémomètre primaire (en tête de mât)

Figure K.1 – Exemple avec mât météorologique en treillis triangulaire



IEC

Anglais	Français
Remaining area in which the valid sector for in situ comparison can be placed (after consideration of wake effects of the mast)	Surface restante dans laquelle peut être placé le secteur valide pour la comparaison in situ (après étude des effets de sillage du mât)
Control anemometer (on side boom below top)	Anémomètre de commande (sur la flèche latérale en dessous de la tête)
Invalid sector for in situ comparison (due to wake effects of the mast)	Secteur non valide pour la comparaison in situ (en raison des effets de sillage du mât)
Min. 45°	45° au minimum
Min. 45°	45° au minimum
Horizontal connecting lines between center of control anemometer and outermost parts of mast (at the same height as the control anemometer)	Lignes de connexion horizontales entre le centre de l'anémomètre de commande et les parties les plus externes du mât (à la même hauteur que l'anémomètre de commande)
Mast	Mât
Primary anemometer (on top)	Anémomètre primaire (en tête)

Figure K.2 – Exemple avec mât météorologique tubulaire

Annexe L (normative)

Application de la technologie de télédétection

L.1 Généralités

L'Annexe L décrit les exigences de fonctionnement des dispositifs de télédétection de la vitesse du vent, notamment les dispositifs de détection et télémétrie par ondes lumineuses (LIDAR, *Light Detection And Ranging*) et par ondes sonores (SODAR, *Sonic Detection And Ranging*) lorsqu'ils sont déployés dans le cadre des essais de courbe de puissance de l'éolienne. Une procédure visant à assurer la traçabilité des mesures selon les normes internationales est prévue; elle présente les composantes d'incertitude associées à utiliser pour évaluer la courbe de puissance.

Dans la présente version, les procédures dépendent des restrictions suivantes:

- a) Un mât météorologique d'au moins 40 m de haut ou atteignant la hauteur de l'extrémité inférieure de l'éolienne à l'essai doit être utilisé lors de l'essai de courbe de puissance pour surveiller les performances du dispositif de télédétection (une hauteur de l'extrémité inférieure du rotor de 30 m exige, par exemple, une hauteur de surveillance d'au moins 30 m, alors qu'une hauteur de l'extrémité inférieure du rotor de 50 m exige un mât météorologique de surveillance d'au moins 40 m de haut).
- b) Seuls les dispositifs de télédétection au sol sont utilisés (les montages de la nacelle ne sont pas inclus, par exemple).
- c) L'utilisation de la télédétection pour procéder aux évaluations de la performance de puissance se limite aux terrains plats, c'est-à-dire aux situations dans lesquelles l'étalonnage du site n'est pas exigé (voir l'Annexe B).

Par rapport aux mesures issues d'un anémomètre à coupelles monté sur un mât météorologique, les mesures du dispositif de télédétection affichent en général un certain degré de dispersion. Une certaine partie de cette dispersion est due à la sensibilité du dispositif de télédétection aux diverses conditions environnementales (la température et le cisaillement du vent, par exemple). Il incombe à l'essai de classification (voir Article L.2) d'identifier et de quantifier ces sensibilités pour un certain nombre de hauteurs discrètes couvrant la plage de mesures concernée. A l'instar des anémomètres à coupelles, l'hypothèse retenue est la suivante: ces sensibilités dépendent du type, et il est nécessaire de procéder à l'essai de classification pour chaque type de dispositif de télédétection, pour au moins deux instruments de chaque type, et en au moins deux emplacements.

La dispersion restante dans la comparaison des anémomètres à coupelles est considérée comme un bruit aléatoire. Cela provient d'une diversité de sources. Par exemple, la décorrélation des turbulences dans le vent due à la distance entre les mâts météorologiques se traduit par une dispersion. De même, la distance entre les volumes de sonde individuels du capteur de télédétection lui-même peut contribuer à ce type de dispersion. L'hypothèse retenue est la suivante: le bruit aléatoire est spécifique à l'unité et au site, c'est-à-dire qu'il peut varier entre les différentes évaluations du même dispositif de télédétection.

Pour pouvoir être utilisée dans le cadre d'un essai de courbe de puissance, une unité particulière d'un dispositif de télédétection doit en premier lieu faire l'objet d'un essai de vérification (Article L.3). En guise d'alternative, l'essai de vérification peut également être réalisé lors de l'essai de courbe de puissance. Cet essai consiste à comparer les mesurages du dispositif de télédétection à ceux des anémomètres à coupelles étalonnés montés sur un mât météorologique s'étendant sur une partie significative de la plage de hauteurs observée. Cet essai a pour objet d'assurer la traçabilité par rapport aux normes internationales de ce dispositif particulier, sous la forme d'une incertitude. En règle générale, l'essai de courbe de puissance a lieu à un autre endroit et un autre moment, et donc avec une distribution des conditions environnementales différentes de celle de l'essai de vérification. Selon les

sensibilités identifiées lors de l'essai de classification, les différentes conditions environnementales modifient les performances du dispositif de télédétection, augmentant l'incertitude par rapport à celle déterminée dans l'essai de vérification. Les expressions d'incertitude du dispositif de télédétection et la manière dont il convient de les utiliser dans l'évaluation de l'incertitude de la courbe de puissance sont données à l'Article L.4.

L'Article L.5 décrit comment les mesures de l'anémomètre à coupelles provenant du mât météorologique court peuvent être utilisées pour surveiller les performances du dispositif de télédétection. En assurant au moins une hauteur de mesure commune, la cohérence de l'incertitude obtenue dans le cadre de l'essai de classification et de l'essai de vérification avec les performances du dispositif de télédétection lors de l'essai de courbe de puissance peut être évaluée. En cas d'incohérence, les incertitudes correspondantes utilisées dans l'essai de courbe de puissance sont augmentées. Cela assure un "filet de sécurité" utile pour la méthodologie et un mécanisme de retour d'informations dont il convient qu'il favorise l'obtention d'évaluations d'incertitude réalistes.

Des détails spécifiques relatifs à l'utilisation du dispositif de télédétection dans l'essai de courbe de puissance sont donnés à l'Article L.6. La position et les dimensions des volumes de la sonde du dispositif de télédétection revêtent une importance particulière eût égard à l'éolienne à l'essai.

Les exigences de consignation pour l'ensemble de la méthodologie sont données à l'Article L.7.

L.2 Classification des dispositifs de télédétection

L.2.1 Généralités

La précision du RSD peut être influencée par des variables météorologiques. Les conditions météorologiques au cours de l'essai de courbe de puissance pouvant être différentes de celles qui prédominent pendant l'essai de vérification de performance du RSD, ces influences sont liées à une incertitude supplémentaire. Il est donc nécessaire de déterminer dans quelle mesure les performances du dispositif de télédétection sont sensibles aux variables météorologiques. Les résultats de ces essais doivent identifier les variables ayant un impact sur les performances du dispositif de télédétection et déterminer la classification de l'instrument.

La plus simple de ces évaluations implique de tenir compte de la différence entre la mesure du dispositif de télédétection et la mesure de référence en fonction d'une variable météorologique à la fois. Une classe de précision du dispositif de télédétection doit être évaluée pour certaines plages de diverses variables environnementales s'apparentant à la classification des anémomètres à coupelles conformément à l'Annexe I, en s'appuyant sur l'analyse empirique des sensibilités observées lors des essais de classification. Il convient de veiller à assurer l'interdépendance possible des variables environnementales (cisaillement du vent et intensité des turbulences, par exemple) de manière à ne pas compter deux fois les sensibilités par inadvertance. Les incertitudes dues à la classification du dispositif de télédétection peuvent alors être évaluées.

Une classe de précision spécifique au cas peut également être évaluée selon les sensibilités du système de télédétection et la variation des variables environnementales observées lors des essais de vérification de performance et des essais de courbe de puissance. Il convient d'établir clairement si un résultat de classification a été déduit de manière générique sur plusieurs unités ou s'il repose sur une évaluation spécifique au cas.

L.2.2 Acquisition de données

L'essai de classification repose sur des mesurages concurrents obtenus par le dispositif de télédétection et un mât météorologique de référence élevé auquel il est comparé. Les mesurages sont colocalisés, de manière à caractériser l'écoulement dans le même volume

d'air. Les degrés de concurrence et de colocation qui doivent s'appliquer aux mesurages sont ceux permettant de déterminer la relation la plus précise et la mieux comprise entre eux. En particulier:

- a) Les mêmes intervalles de moyennage doivent être utilisés pour le dispositif de télédétection et le capteur de référence faisant l'objet de la comparaison: des moyennes de 10 min doivent être enregistrées. Outre les moyennes de 10 min, les écarts-types et les valeurs extrêmes des variables mesurées dans les périodes de 10 min doivent être enregistrés.
- b) Le nombre d'échantillons acquis par chaque instrument lors de chaque intervalle de moyennage afin d'obtenir une moyenne doit être enregistré.
- c) Il doit être noté si les échantillons individuels acquis dans l'intervalle de moyennage par le dispositif de télédétection sont des valeurs cumulées, représentant, par exemple, un spectre intégré entre le début de l'intervalle de moyennage et le moment d'acquisition de l'échantillon. Cela a un impact sur les statistiques, qui exigent que les échantillons successifs soient indépendants, comme l'écart-type utilisé, par exemple, pour les évaluations des turbulences.
- d) Le dispositif est installé sur site, et une analyse des mesurages est réalisée de manière à limiter les influences extérieures sur la relation entre le dispositif de télédétection et les mesurages du capteur de référence. Ces influences peuvent inclure, mais sans s'y limiter: les écoulements, les échos fixes, les variations réelles de l'écoulement entre le volume de mesure du dispositif de télédétection et le point de mesure de l'instrument de référence. La distance entre le mât météorologique et le dispositif de télédétection doit être un compromis permettant une bonne corrélation entre les mesures du mât météorologique et du dispositif de télédétection, tout en empêchant ou limitant l'influence du mât météorologique sur le dispositif de télédétection.
- e) Les capteurs de référence montés sur mât météorologique doivent satisfaire aux exigences de la présente norme. Cela concerne particulièrement l'étalonnage, la classification et le montage.
- f) Il convient que le mât météorologique de référence présente de préférence une section transversale et une solidité constantes sur toute sa hauteur. De cette manière, l'influence du mât météorologique sur les anémomètres montés sur la flèche reste constante et permet une comparaison plus précise du cisaillement du vent mesuré entre le mât météorologique et le dispositif de télédétection.

Le dispositif de télédétection et les capteurs de référence sont synchronisés dans les limites de 1 % de l'intervalle de moyennage, et ce degré de synchronisation est vérifié et soumis à l'essai au moins une fois par semaine pour connaître la dérive. Si la comparaison des horodatages indique qu'une dérive s'est produite, l'horloge du dispositif de télédétection est réinitialisée pour être synchronisée avec celle du capteur de référence, les horodatages des données de télédétection étant ajustés de manière à compenser la dérive sur la période sur laquelle elle a été mise en évidence par interpolation linéaire. Les données sont acquises tant que les exigences de couverture de données ci-dessous ne sont pas satisfaites:

- a) Les mesures de la vitesse du vent du capteur de référence sont réparties en tranches 0,5 m/s centrées sur des multiples entiers de 0,5 m/s.
- b) Les données sont filtrées selon les recommandations du fabricant du dispositif et les exigences en L.2.3. Les exigences suivantes doivent être satisfaites après le filtrage.
- c) Les exigences d'acquisition de données d'un essai de classification ne doivent pas être considérées comme satisfaites tant qu'au moins 3 paires de mesures concurrentes, colocalisées et filtrées valides n'ont pas été enregistrées dans chaque tranche de vitesse du vent centrée entre 4 m/s et 16 m/s (valeurs extrêmes incluses).
- d) La quantité de données acquises doit couvrir au moins 180 h.
- e) La campagne d'acquisition de données dure au moins 3 mois et couvre une variété suffisante de conditions environnementales (de l'hiver à l'été, par exemple). La base de données doit couvrir au moins 25 % des tranches (voir Tableau L.3) avec un nombre minimal de points de données (voir l'Equation (L.2) pour toutes les variables réputées avoir un impact sur la précision du RSD.

La classification et la vérification du dispositif de télédétection doivent être considérées comme valides pour les besoins d'un essai de courbe de puissance d'une éolienne si les anémomètres à coupelles de référence utilisés lors des essais de classification et de vérification ont été montés à au moins 3 hauteurs, y compris la hauteur de l'extrémité inférieure $\pm 25\%$ et la hauteur du moyeu de l'éolienne $\pm 25\%$. Ces exigences de hauteur pour la classification et la vérification s'appliquent si le dispositif est utilisé pour les mesures du vent sur toute la plage de hauteurs du rotor de l'éolienne ou uniquement jusqu'à la hauteur du moyeu.

L.2.3 Préparation des données

Les filtres de données suivants doivent être appliqués:

- a) Le mât météorologique de référence ne doit être soumis à aucun sillage de la part des éoliennes et des obstacles définis à l'Annexe A.
- b) Les volumes de sonde dans lesquels le dispositif de télédétection acquiert une mesure de vitesse radiale ne doivent être soumis à aucun sillage et à aucune perturbation de l'écoulement dû aux éoliennes et aux obstacles décrits à l'Annexe A. L'influence du sillage du mât météorologique de référence sur les mesures du dispositif de télédétection doit être examinée en traçant le rapport des mesures du dispositif de télédétection et du capteur de référence en fonction de la direction du vent. Les critères relatifs aux valeurs admissibles de ce rapport peuvent être développés en référence aux considérations correspondantes de l'anémométrie à coupelles présentées à l'Article G.4. Les mesures du dispositif de télédétection doivent être réalisées si elles sont influencées soit par le mât météorologique, soit par les haubans.
- c) Les anémomètres à coupelles de référence ne doivent pas être soumis à l'influence des sillages du mât météorologique, de ses haubans ou du paratonnerre, définie dans la présente norme.
- d) Les anémomètres à coupelles de référence ne doivent pas être influencés par le givrage. Cela peut être obtenu par n'importe quelle méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats.
- e) Les mesures enregistrées pour chaque intervalle de moyennage tant par le dispositif de télédétection que par les capteurs de référence représentent une seule période continue de fonctionnement, de durée égale à l'intervalle de moyennage. Toutefois, comme indiqué ci-dessous en L.2.4, les exigences en matière de disponibilité des données peuvent être assouplies. Il convient de vérifier l'influence que l'assouplissement des exigences pourrait avoir sur la précision de mesure par une analyse de sensibilité. Si le dispositif de télédétection n'enregistre pas la proportion de la période dans l'intervalle de moyennage de 10 min au cours de laquelle il a été disponible, un facteur de qualité générale doit être enregistré pour indiquer la fiabilité de la mesure d'une manière semblable à la disponibilité du dispositif. Ensuite, les données peuvent être filtrées ou une analyse de sensibilité peut être réalisée en faisant référence au facteur de qualité. Des lignes directrices doivent être fournies par le fabricant eu égard au traitement approprié du facteur de qualité.
- f) En règle générale, il convient de ne procéder à aucun filtrage de précipitations. Il convient de traiter les précipitations comme une variable environnementale dans l'essai de classification. Si les lignes directrices d'un fabricant de dispositifs de télédétection prévoient un filtrage en fonction des précipitations, il convient de les suivre. Si le filtrage est réalisé en fonction des précipitations, il convient de considérer les données filtrées comme un ensemble de données particulier, et de procéder en conséquence à la classification, à la vérification et à l'application du dispositif de télédétection.

Les mesures des capteurs de référence montés sur la flèche peuvent être corrigées pour tenir compte des effets du mât météorologique (effets d'obstruction et effets d'accélération de l'écoulement). Il convient de noter que ces corrections des effets du mât météorologique induisent une incertitude supplémentaire par rapport aux capteurs de référence montés en tête de mât. La correction peut être obtenue par n'importe quelle méthode jugée adaptée pour la réduction de l'incertitude totale, conformément à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats. L'incertitude associée à l'utilisation d'anémomètres montés sur la flèche est présentée à l'Annexe D et à l'Article G.4.

Tous les critères de filtrage utilisés et leurs effets respectifs sur l'ensemble de données doivent être enregistrés et consignés dans un rapport.

L.2.4 Principes et exigences d'un essai de sensibilité

L'écart observé entre les mesures du dispositif de télédétection et des capteurs de référence doit être analysé en termes de sensibilité aux différentes variables environnementales. Selon l'utilisation du dispositif de télédétection dans le cadre de la campagne d'essai de courbe de puissance, la classe de précision doit être évaluée en termes de mesure absolue de la composante de la vitesse horizontale du vent.

Une classe de précision du dispositif de télédétection pour d'autres applications impliquant l'acquisition d'autres paramètres d'écoulement du vent (l'intensité des turbulences ou la direction du vent, par exemple) peut être déduite en termes de sensibilité des mesures de ces paramètres en fonction de différentes variables environnementales, à l'aide d'instruments de référence adaptés. Cet aspect va au-delà du domaine d'application d'un simple⁴⁰ essai de courbe de puissance, seule l'évaluation d'une classe de précision en termes de vitesse horizontale du vent étant abordée ici.

La sensibilité initiale à soumettre à l'essai doit se rapporter à l'assouplissement des critères décrits au point e) en L.2.3. La sensibilité de l'écart entre les capteurs de référence et le dispositif de télédétection relative à la disponibilité de ce dernier dans les limites de l'intervalle de moyennage ou du facteur de qualité correspondant des mesures (défini par le fabricant) doit être examinée. Les données de télédétection doivent être considérées comme acceptables si elles se caractérisent par un niveau de disponibilité ou un facteur de qualité dont il a été démontré qu'il n'a aucun impact significatif sur l'écart entre les mesures des capteurs de référence et celles du dispositif de télédétection.

L'écart en pourcentage entre les moyennes de 10 min du paramètre de sortie à l'étude acquis par le dispositif de télédétection (RSD) et les capteurs de référence à un niveau de hauteur est considéré comme une variable dépendante, qui est analysée comme étant fonction d'une variable environnementale dans le cadre d'un essai de classification:

$$\text{Variable dépendante:} \quad \frac{(v_{\text{RSD}} - v_{\text{reference}})}{v_{\text{reference}}} \times 100 \% \quad (\text{L.1})$$

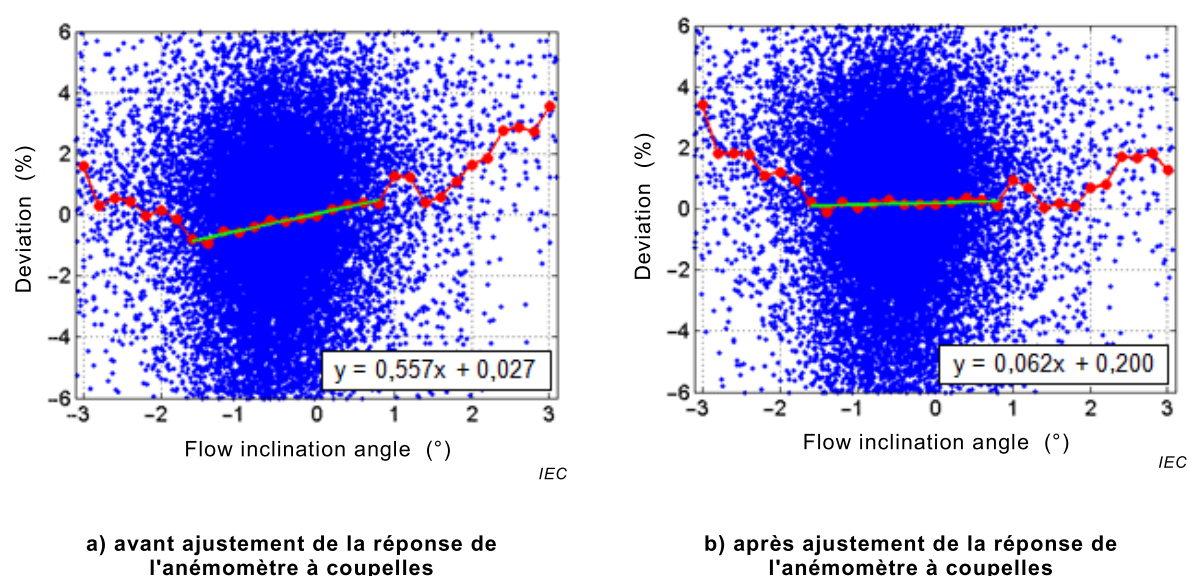
Toutes les variables environnementales sont considérées comme pouvant relever du domaine d'application de l'analyse de sensibilité. Une liste non exhaustive de variables à prendre en compte peut être: l'exposant de cisaillement du vent, l'intensité des turbulences, la pluie, la direction du vent, la température de l'air, la masse volumique de l'air, le différentiel de température à deux hauteurs différentes, l'angle d'écoulement ascendant, la déviation de la trajectoire du vent et la couverture nuageuse. Certains paramètres pertinents peuvent être spécifiques à l'instrument (la disponibilité des données ou le facteur de qualité, par exemple) et peuvent être spécifiés par le fabricant.

La sensibilité d'un paramètre environnemental peut être l'artefact d'une erreur aisément corrigée dans la configuration du dispositif de télédétection. Par exemple, une sensibilité marquée au cisaillement du vent peut apparaître en cas d'erreur systématique dans les hauteurs associées aux mesures de la vitesse du vent du dispositif de télédétection. Si une forte sensibilité est observée avec un dispositif de télédétection ou en cas de variation significative de la sensibilité entre les essais, il convient de contrôler le dispositif pour ce type d'erreurs. Si des erreurs sont détectées et corrigées, il convient de répéter les essais de sensibilité.

⁴⁰ Par exemple, un essai qui n'intègre pas la correction de la déviation de la trajectoire du vent ou la normalisation des turbulences.

Si l'anémomètre à coupelles de référence montre une sensibilité connue à une variable environnementale, il convient de tenter de supprimer l'influence de cette sensibilité de l'essai de sensibilité. Cela peut être obtenu par toute méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats. Par exemple, la Figure J.1 représente les effets de l'angle d'écoulement ascendant sur la vitesse du vent mesurée par un anémomètre à coupelles usuel de classe 1,7A, déterminés à la suite d'essais en soufflerie normalisés de l'industrie.

La Figure L.1 a) montre la réponse d'un dispositif de télédétection à l'angle d'écoulement ascendant déterminé en fonction des données issues d'un anémomètre à coupelles du type représenté par la Figure J.1. Dans la Figure L.1 b), un modèle linéaire a été adapté aux données de la Figure J.1 dans la région entre $\pm 3^\circ$ et utilisé pour ajuster les points de données afin de supprimer les effets de la réponse de l'anémomètre à coupelles. La figure montre que la sensibilité enregistrée du dispositif de télédétection de la Figure L.1 a) est dans ce cas au moins partiellement imputable à l'anémomètre à coupelles de référence.



Anglais	Français
Deviation [%]	Ecart [%]
Flow inclination angle [°]	Angle d'inclinaison de l'écoulement [°]
Flow inclination angle [°]	Angle d'inclinaison de l'écoulement [°]

Figure L.1 – Ecart par rapport à l'angle d'écoulement ascendant déterminé pour un dispositif de télédétection en fonction de l'anémomètre à coupelles de la Figure J.1

Les variables environnementales doivent être analysées pour identifier les interdépendances. Dans ce cas, des analyses plus approfondies doivent être réalisées pour identifier laquelle des variables environnementales a un impact sur l'écart de mesure. Cela peut être obtenu toute méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats. Il convient que la documentation comporte suffisamment de détails pour la réplication des résultats à partir des données acquises lors de l'essai de classification. Les méthodologies suggérées pour y parvenir sont décrites en L.2.6. Seules les variables environnementales s'étant révélées avoir un impact direct sur l'écart de mesure doivent être incluses dans l'analyse de sensibilité. Ces variables sont alors considérées comme indépendantes.

Si des variables environnementales réputées avoir un impact direct sur l'écart de mesure sont ignorées dans l'essai de sensibilité, cela est susceptible de donner lieu à une incertitude supplémentaire au stade de l'application (voir Article L.5). Si une surveillance ultérieure du dispositif de télédétection avec un mât météorologique d'anémomètre court réalisée lors de

l'essai de courbe de puissance montre que les résultats de l'essai de sensibilité sont excessivement prudents, une révision des variables environnementales incluses dans l'essai de sensibilité peut être exigée.

Une analyse de régression linéaire par la méthode des moindres carrés (OLS, *Ordinary Least Squares*) à une dimension et deux paramètres doit être réalisée pour chaque paire de variables dépendantes et indépendantes. Les paramètres suivants sont calculés à partir de l'analyse de régression:

- a) pente: m ;
- b) décalage: c ;
- c) coefficient de détermination qui, dans le cas de la régression linéaire par la méthode des moindres carrés, est le coefficient de corrélation: r^2 ;
- d) écart-type de la variable indépendante: std ;
- e) valeur moyenne de la variable indépendante: avg .

La pente m et le décalage c doivent être estimés sur des données moyennées par tranches pour la variable environnementale mesurée, la taille de la tranche à utiliser étant donnée au Tableau L.1.

Tableau L.1 – Exemple de largeur de tranche pour une liste de variables environnementales

Variable indépendante	Largeur de tranche	Unité
Exposant de cisaillement du vent	0,05	Sans dimension
Intensité des turbulences	0,01	Sans dimension
Pluie	0,1	mm
Disponibilité du dispositif de télédétection	1	%
Direction du vent	5	°
Température de l'air	2	°C
Masse volumique de l'air	0,05	kg/m ⁻³
Gradient de température	0,002	K/m
Ecoulement ascendant	0,2	°
Gradient de déviation de la trajectoire du vent	0,04	°/m

S'agissant des variables à inclure dans l'analyse de sensibilité et qui ne figurent pas au Tableau L.1, il convient de choisir des largeurs de tranches adaptées en fonction de la plage et de la répartition des données.

S'agissant d'une variable environnementale particulière, il convient d'inclure les tranches dans l'essai de sensibilité uniquement lorsqu'elles satisfont aux critères figurant dans les Equations (L.2) et (L.3):

$$n_i > \frac{N}{2n_b} \quad (\text{L.2})$$

où

n_b est le nombre de tranches en fonction des plages de variables données au Tableau L.3;

n est le nombre total de points de données;

n_i est le nombre de points de données dans la tranche i .

L'Equation (L.3) doit être appliquée seulement lorsque les sensibilités sur la mesure de la vitesse du vent sont analysées:

$$\frac{\sigma(d_i)}{\sqrt{n_i}} \frac{v_{ref,i}}{100} < 0,03 \text{ m/s} \quad (\text{L.3})$$

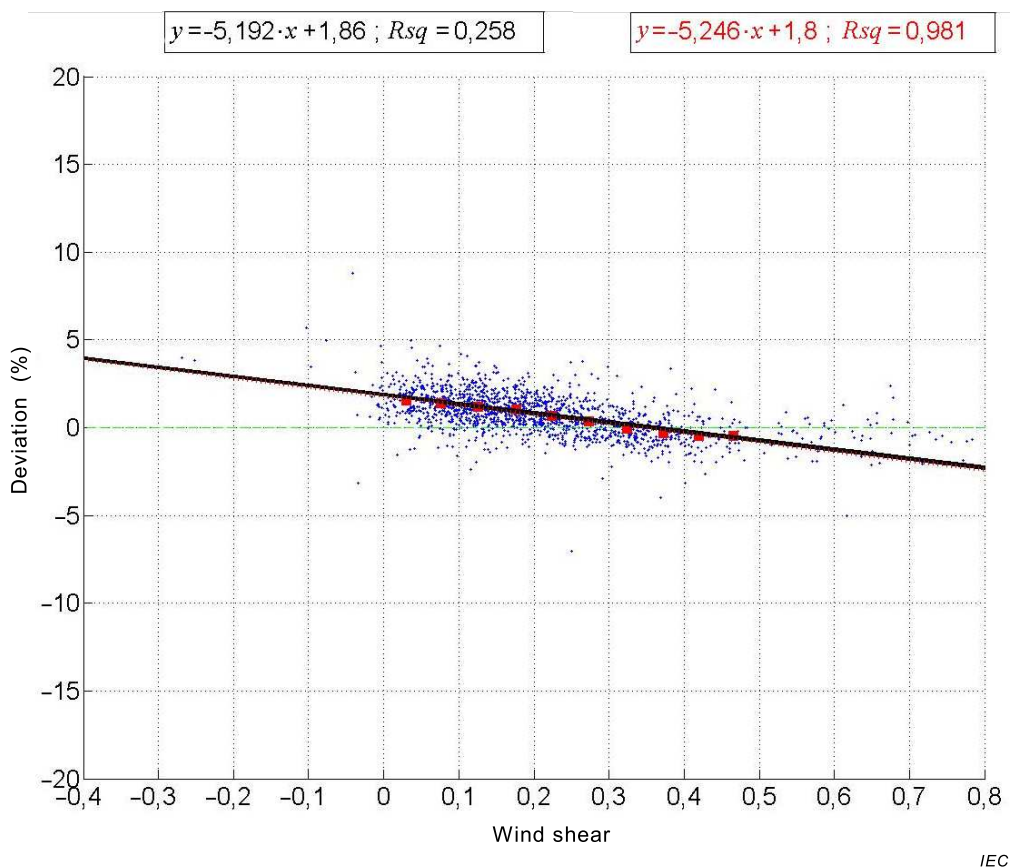
où

d_i sont les données dans la tranche i ;

$\sigma(d_i)$ est l'écart-type des écarts de vitesse du vent en pourcentage des données pendant 10 min dans la tranche i ;

$V_{ref,i}$ est la valeur moyenne de la vitesse du vent de référence dans la tranche i .

Le coefficient de corrélation (r^2), l'écart-type des variables indépendantes (std) et la valeur moyenne des variables indépendantes (avg) doivent être estimés à l'aide des données sur 10 min dans les tranches incluses dans l'essai de sensibilité.



Anglais	Français
Deviation (%)	Ecart (%)
Wind shear	Cisaillement du vent

Les régressions linéaires sont tracées pour les données sur 10 min (en noir) et pour les données moyennées par tranche (en rouge).

Figure L.2 – Exemple d'analyse de sensibilité en fonction du cisaillement du vent

La sensibilité se définit comme la pente multipliée par l'écart-type de la variable indépendante: $m \cdot std$. La sensibilité indique l'étendue, exprimée en pourcentage, de la variation de l'écart entre les mesures du dispositif de télédétection et du capteur de référence à la suite d'une variation de la variable indépendante d'un écart-type.

Tableau L.2 – Paramètres déduits d'une analyse de sensibilité d'un dispositif de télédétection

Hauteur au-dessus du sol	Variable indépendante	<i>avg</i> Variable indépendante	<i>std</i> Variable indépendante	<i>m</i>	Sensibilité <i>m</i> × <i>std</i>	<i>r</i> ²	Sensibilité <i>r</i>
[m]	[-]	[unité variable]	[unité variable]	[%/unité variable]	[%]	[-]	[%]
135	Exposant de cisaillement du vent	0,21	0,19	–2,324	–0,45	0,235	–0,218
104		0,21	0,2	–1,918	–0,38	0,085	–0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Intensité des turbulences	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Pluie (oui=1, non=0)	0,02	0,13	0,205	0,03	0,001	0,001
104		0,04	0,19	1,168	0,22	0,028	0,037
72		0,03	0,18	0,499	0,09	0,007	0,008
135	Direction du vent	247,28	31,62	–0,007	–0,22	0,059	–0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Température de l'air à 131 m	14,66	2,7	0,044	0,12	0,016	0,015
104		14,56	2,66	–0,042	–0,11	0,008	–0,010
72		15,16	3,43	–0,091	–0,31	0,083	–0,089
135	Masse volumique de l'air	1,23	0,01	–16,43	–0,24	0,065	–0,061
104		1,23	0,01	1,804	0,03	0	0,000
72		1,22	0,02	5,208	0,08	0,005	0,006
135	Différentiel de température entre 133 m et 10 m	–0,69	1,36	–0,112	–0,15	0,027	–0,025
104		–0,69	1,36	–0,444	–0,6	0,217	–0,279
72		–0,64	1,53	–0,281	–0,43	0,158	–0,171
135	Angle d'écoulement ascendant	0,35	1,37	–0,085	–0,12	0,015	–0,015
72		–0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	15,36	10,01	–0,036	–0,36	0,145	–0,137
104		15,26	10,05	–0,07	–0,71	0,298	–0,388
72		15	9,26	–0,036	–0,33	0,092	–0,100

La Figure L.2 et le Tableau L.2 ci-dessus donnent un exemple d'analyse de sensibilité d'un dispositif de télédétection réalisée selon divers paramètres environnementaux. La sensibilité du dispositif a été analysée à trois hauteurs différentes. Seules les données de télédétection dont la disponibilité est comprise dans l'intervalle de moyennage d'au moins 80 % ont été prises en compte pour l'essai. Comme le montre le Tableau L.2, et conformément aux critères de signification définis en L.2.5, le cisaillement du vent, l'intensité des turbulences, la direction du vent, le différentiel de température de l'air (comme simple indicateur de stratification), l'angle d'écoulement ascendant et la déviation de la trajectoire du vent s'avèrent avoir un impact important sur l'écart entre les mesures de la vitesse du vent réalisées par le dispositif de télédétection et celles de l'anémomètre à coupelles de référence. Les autres variables indépendantes s'avèrent ne pas être importantes. Toutefois, certaines variables qui semblent avoir un impact sur les performances du dispositif de télédétection peuvent n'avoir aucune influence. Si leur variation est corrélée avec la variation de certaines

autres variables qui ont également une influence, cette corrélation peut être la raison de leur apparente influence. L'interdépendance entre les variables doit être analysée de manière à identifier les variables qui exercent une véritable influence (voir L.2.6) avant d'estimer la classe de précision finale du dispositif de télédétection. Par exemple, des techniques de régression multidimensionnelles peuvent être utilisées pour y parvenir.

La classification s'apparente à la classification existante des anémomètres à coupelles et à ultrasons conformément à la présente norme (voir l'Annexe I et l'Annexe J). La classe de dispositif de télédétection peut être évaluée pour les conditions prédéfinies ou pour les conditions particulières qui prévalent lors de l'application du dispositif de télédétection.

Des conditions analogues à la classification A des anémomètres à coupelles et à ultrasons conformément à la présente norme (voir l'Annexe I et l'Annexe J) sont données au Tableau L.3.

Tableau L.3 – Plages des paramètres environnementaux pour l'analyse de la sensibilité

Variable indépendante		Max	Min	Plage	Source
Exposant de cisaillement du vent	[-]	0,80	–0,40	1,20	N/A
Intensité des turbulences	[-]	0,24	0,03	0,21	La présente norme
Pluie (oui=1, non=0)	[-]	1	0	1	Définition du capteur
Disponibilité	[%]	100	80	20	Définition du filtre
Direction du vent	[°]	360	0	180	L'écart maximal entre 2 directions est de 180°.
Température de l'air	[°C]	40	0	40	La présente norme
Masse volumique de l'air	[kg/m ³]	1,35	0,90	0,45	La présente norme
Gradient de température entre 133 m et 10 m de hauteur	[K/m]	0,06	–0,02	0,08	N/A
Angle d'écoulement ascendant	[°]	3	–3	6	La présente norme
Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m de hauteur	[°/m]	0,2	–0,2	0,4	N/A

La plage de disponibilités du dispositif de télédétection doit être cohérente avec la plage à appliquer lors du déploiement sur site. Sauf si elles ont été déterminées par la configuration des capteurs de référence, les limites du différentiel de température de l'air observées entre les deux hauteurs indiquées doivent être égales à 10 fois le gradient normalisé entre les hauteurs prises en compte (le gradient normalisé est de 0,65 K/100 m), et la déviation de la trajectoire du vent doit être égale à 4 fois l'écart-type de la différence entre les directions moyennes du vent sur 10 min aux hauteurs indiquées.

L.2.5 Evaluation de l'importance d'une variable environnementale

L'importance d'une variable est évaluée en mesurant son degré d'influence sur la mesure du dispositif de télédétection. Les essais de sensibilité peuvent révéler qu'il n'existe aucune relation significative entre la variable dépendante et certaines variables indépendantes. Par conséquent, seules les variables indépendantes pertinentes doivent être prises en compte. La pertinence est déterminée dans les cas suivants:

- une sensibilité d'au moins 0,5 est démontrée ou un produit du coefficient de corrélation r et de la sensibilité d'au moins 0,1 est déterminé;
- l'analyse de sensibilité d'une variable indépendante doit être pertinente pour toutes les hauteurs de mesure si l'une des conditions ci-dessus est satisfaite pour une seule hauteur.

Pour une sensibilité d'au moins 0,5, un impact important de la variable indépendante sur la précision du dispositif de télédétection est directement mesuré lors de l'essai de classification. Le coefficient de corrélation peut modifier ce critère, étant donné qu'il indique l'importance de la relation entre les variables dépendantes et les variables indépendantes. Le coefficient de corrélation et la sensibilité indiquent la pertinence d'une variable indépendante. Le produit des deux mesures définit donc la seconde condition alternative du premier point ci-dessus.

Il convient d'exclure de l'analyse de sensibilité les variables environnementales dont la plage mesurée ne couvre pas au moins 25 % des tranches (voir Tableau L.3) avec un nombre minimal de points de données défini par l'Equation (L.2). Les résultats de sensibilité déduits de ces variables ne seraient pas représentatifs d'une relation avec l'écart de mesure. Même si une variable peut être éliminée de l'analyse de sensibilité en raison d'une variation insuffisante pour l'établissement fiable d'une relation avec l'écart de mesure, il se peut qu'une plage de variation plus étendue soit observée lors de l'application du dispositif dans le cadre de l'essai de performance de puissance. S'il s'avère que la variable en question a un impact sur l'écart de mesure par l'intermédiaire du processus de surveillance lors de l'application, le dispositif peut être rejeté. A défaut, l'incertitude supplémentaire sera appliquée aux résultats de manière à refléter correctement cela, conformément à l'Article L.4. Il convient d'exclure de l'analyse de sensibilité les variables environnementales dont il a été déterminé qu'elles influent sur l'écart de mesure uniquement par leur corrélation avec d'autres variables environnementales (voir L.2.6).

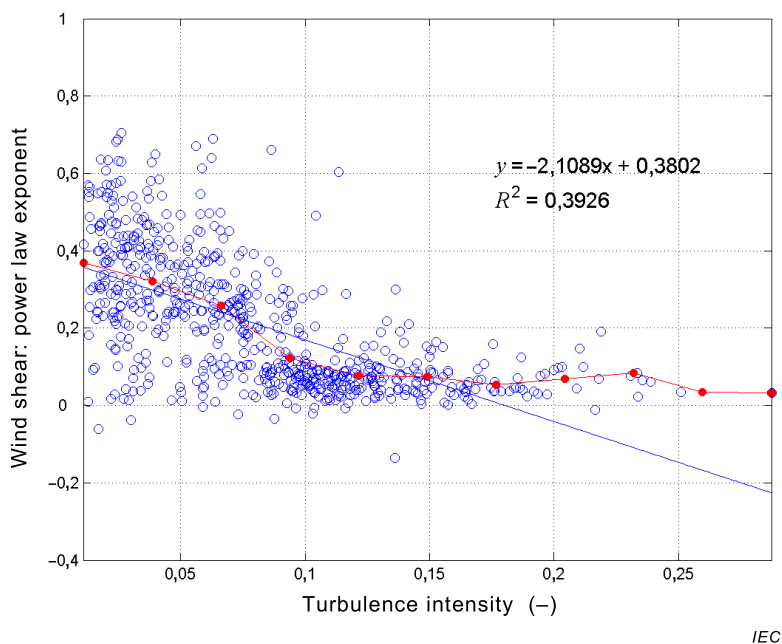
Un choix de variables indépendantes pertinentes pour un dispositif de télédétection est représenté au Tableau L.4.

**Tableau L.4 – Exemple de choix de variables environnementales
qui se révèlent avoir un impact significatif**

Hauteur au- dessus du sol	Variable indépendante	<i>avg</i> Variable indépendante	<i>std</i> Variable indépendante	<i>m</i>	Sensibilité <i>m × std</i>	<i>r</i> ²	Sensibilité × <i>r</i>
[m]	[-]	[unité variable]	[unité variable]	[%/unité variable]	[%]	[-]	[%]
135	Exposant de cisaillement du vent	0,21	0,19	-2,324	-0,45	0,235	-0,218
104		0,21	0,2	-1,918	-0,38	0,085	-0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Intensité des turbulences	0,07	0,03	8,855	0,26	0,08	0,074
104		0,07	0,03	13,902	0,39	0,093	0,119
72		0,08	0,03	15,812	0,4	0,133	0,146
135	Direction du vent	247,28	31,62	-0,007	-0,22	0,059	-0,053
104		252,83	34,19	0,012	0,43	0,108	0,141
72		225,14	11,39	0,003	0,03	0,001	0,001
135	Différentiel de température entre 133 m et 10 m	-0,69	1,36	-0,112	-0,15	0,027	-0,025
104		-0,69	1,36	-0,444	-0,6	0,217	-0,279
72		-0,64	1,53	-0,281	-0,43	0,158	-0,171
135	Angle d'écoulement ascendant	0,35	1,37	-0,085	-0,12	0,015	-0,015
72		-0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	15,36	10,01	-0,036	-0,36	0,145	-0,137
104		15,26	10,05	-0,07	-0,71	0,298	-0,388
72		15	9,26	-0,036	-0,33	0,092	-0,100

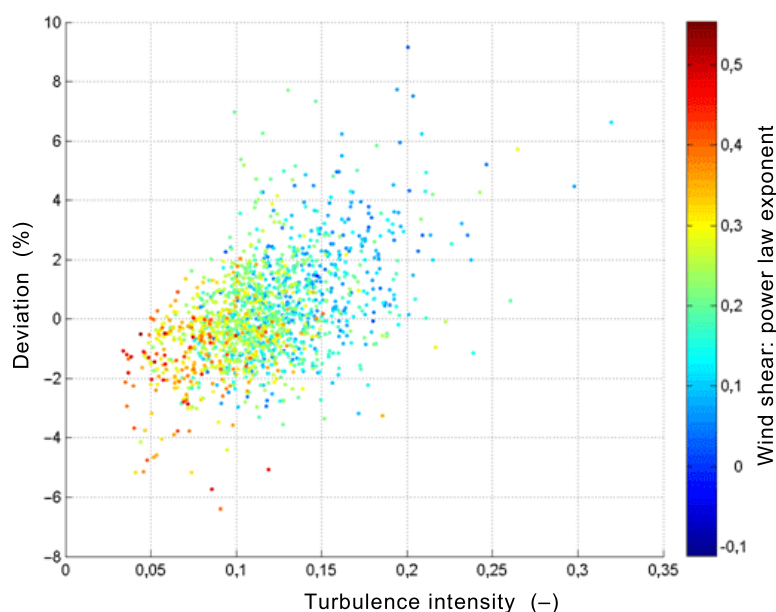
L.2.6 Evaluation de l'interdépendance entre les variables environnementales

L'analyse de sensibilité de L.2.4 repose sur l'hypothèse selon laquelle les variables environnementales à l'étude sont indépendantes, c'est-à-dire non corrélées. Dans la pratique, cela peut ne pas être le cas. Cela peut amener à enregistrer des entrées dans la classe de précision correspondant à des variables particulières, compte tenu de leur corrélation avec d'autres variables, plutôt que d'établir une relation directe avec l'écart de mesure. Une représentation des effets de la corrélation entre les variables environnementales peut être consultée à la Figure L.3 et à la Figure L.4 pour le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences. La Figure L.3 représente la relation entre le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences lors d'un essai de classification. Elle montre que le cisaillement du vent et l'intensité des turbulences au niveau du site d'essai ne sont pas totalement non corrélés lors de la période de mesure en question. Cela se manifeste dans la Figure L.4 sous la forme d'un groupement de points de données à l'intérieur du diagramme de dispersion de l'écart de mesure par rapport à l'intensité des turbulences en fonction de l'amplitude du cisaillement du vent. Ce groupement peut fausser la ligne à partir de laquelle est déterminée la sensibilité du dispositif à l'intensité des turbulences. Grâce à ce mécanisme, une relation dans l'essai de sensibilité peut être transférée d'une variable environnementale directement corrélée à l'écart de mesure vers une autre variable qui ne l'est pas, si les variables environnementales ne sont pas mutuellement indépendantes.



Anglais	Français
Wind shear: power law exponent	Cisaillement du vent: exposant de la loi de puissance
Turbulence intensity [-]	Intensité des turbulences [-]

Figure L.3 – Exemple de cisaillement du vent par rapport à l'intensité des turbulences



IEC

Anglais	Français
Deviation [%]	Ecart [%]
Wind shear: power law exponent	Cisaillement du vent: exposant de la loi de puissance
Turbulence intensity [-]	Intensité des turbulences [-]

La couleur indique le niveau de cisaillement du vent.

Figure L.4 – Exemple d'écart en pourcentage entre les mesures du dispositif de télédétection et celles du capteur de référence en fonction de l'intensité des turbulences

Afin d'atténuer la surestimation de l'incertitude, il est d'éliminer de l'analyse de sensibilité toutes les variables environnementales dont il peut être démontré qu'elles n'ont aucun impact direct sur l'écart de mesure. Un exemple est donné à la Figure L.4, où il apparaît clairement que l'inclusion de l'intensité des turbulences et du cisaillement du vent dans le calcul de l'estimation d'incertitude, et compte tenu de la relation qu'ils entretiennent, donne lieu à une "double comptabilisation" des contributions d'incertitude. L'élimination des variables environnementales corrélées peut être obtenue par n'importe quelle méthode jugée conforme à l'exigence de documentation adéquate de la méthode et des résultats, comme indiqué en L.2.4. Il convient que la documentation comporte suffisamment de détails pour la réplication des résultats à partir des données acquises lors de l'essai de classification.

Les dépendances entre les variables environnementales ont été analysées pour les données utilisées au Tableau L.4. Les variables qui n'ont aucun impact direct sur l'écart de mesure mais qui sont corrélées à une ou plusieurs variables ayant un impact direct sur l'écart de mesure ont été éliminées de l'essai de sensibilité. Après le retrait des effets du cisaillement du vent de l'ensemble de données, l'influence restante de l'intensité des turbulences n'était plus pertinente. Les autres variables sont présentées dans le Tableau L.5. Seuls le cisaillement du vent, l'angle d'écoulement ascendant et la déviation de la trajectoire du vent s'avèrent avoir un impact important sur l'écart entre les mesures de la vitesse du vent réalisées par le dispositif de télédétection et celles de l'anémomètre à coupelles de référence.

**Tableau L.5 – Paramètres de l'analyse de sensibilité restants
après l'analyse de l'interdépendance des variables**

Hauteur au- dessus du sol	Variable indépendante	<i>avg</i> Variable indépendante	<i>std</i> Variable indépendante	<i>m</i>	Sensibilité <i>m × std</i>	<i>r</i> ²	Sensibilité <i>× r</i>
[m]	[-]	[unité variable]	[unité variable]	[%/unité variable]	[-]	[-]	[-]
135	Exposant de cisaillement du vent	0,21	0,19	–2,324	–0,45	0,235	–0,218
104		0,21	0,2	–1,918	–0,38	0,085	–0,111
72		0,17	0,17	0,607	0,1	0,009	0,009
135	Angle d'écoulement ascendant	0,35	1,37	–0,085	–0,12	0,015	–0,015
72		–0,35	0,73	0,665	0,49	0,17	0,202
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	15,36	10,01	–0,036	–0,36	0,145	–0,137
104		15,26	10,05	–0,07	–0,71	0,298	–0,388
72		15	9,26	–0,036	–0,33	0,092	–0,100

L.2.7 Calcul de la classe de précision

Le principe général du calcul des classes de précision est le suivant:

- définir les plages de toutes les variables restantes ayant un impact important (voir l'exemple du Tableau L.5;
- calculer l'écart maximal de chaque variable indépendante sur la précision du dispositif de télédétection en multipliant la pente de régression *m* par la plage de la variable indépendante (voir Tableau L.2). Un exemple est donné au Tableau L.6;
- calculer l'impact maximal cumulé de toutes les variables indépendantes sur la précision du dispositif de télédétection, en partant du principe que les différentes variables sont totalement indépendantes les unes des autres, de manière à ajouter dans la quadrature les erreurs de mesure maximales engendrées par chaque variable individuelle.

En relation avec le point c), il est reconnu que les variables environnementales à l'étude ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres. Toutefois, eu égard aux évaluations d'incertitude, les différences entre les conditions environnementales qui prévalent lors de l'application du dispositif de télédétection dans le cadre de l'essai de courbe de puissance et de la vérification de performance sont des éléments clés. Ces différences dépendent dans une très large mesure du site d'essai de courbe de puissance et du site d'essai de vérification de performance du RSD. Cette dépendance de site dissocie les variables les unes des autres quant aux calculs d'incertitude. Par conséquent, pour estimer l'impact maximal cumulé, l'indépendance entre les variables est une hypothèse indispensable, malgré les efforts consentis en L.2.6 pour traiter l'interdépendance des variables.

Les classes de précision préliminaires résultant de ce schéma sont données au Tableau L.7. Elles ont été calculées en ajoutant dans la quadrature les écarts maximaux de toutes les variables environnementales et des variables d'influence importantes uniquement, conformément au Tableau L.6 et au Tableau L.4. Les valeurs ne représentent pas le résultat final de la classification.

Tableau L.6 – Exemple de schéma de calcul de l'impact maximal des variables environnementales

Hauteur au-dessus du sol	Variable indépendante	Variable de plage	m	$m \times \text{plage}$
[m]	[-]	[unité variable]	[%/unité variable]	[-]
135	Exposant de cisaillement du vent	1,20	-2,324	2,79
104		1,20	-1,918	2,30
72		1,20	0,607	0,73
135	Intensité des turbulences	0,21	8,855	1,86
104		0,21	13,902	2,92
72		0,21	15,812	3,32
135	Pluie (oui=1, non=0)	1,00	0,205	0,21
104		1,00	1,168	1,17
72		1,00	0,499	0,50
135	Disponibilité du dispositif de télédétection	20,00	0,017	0,34
104		20,00	-0,068	1,36
72		20,00	-0,318	6,37
135	Direction du vent	180,00	-0,007	1,28
104		180,00	0,012	2,24
72		180,00	0,003	0,51
135	Température de l'air à 131 m	40,00	0,044	1,76
104		40,00	-0,042	1,69
72		40,00	-0,091	3,65
135	Masse volumique de l'air	0,45	-16,430	7,39
104		0,45	1,804	0,81
72		0,45	5,208	2,34
135	Différentiel de température entre 133 m et 10 m	8,00	-0,112	0,90
104		8,00	-0,444	3,55
72		8,00	-0,281	2,25
135	Angle d'écoulement ascendant	6,00	-0,085	0,51
72		6,00	0,665	3,99
135	Déviation de la trajectoire du vent entre 133 m et 35 m	40,00	-0,036	1,45
104		40,00	-0,070	2,81
72		40,00	-0,036	1,42

Tableau L.7 – Classes de précision préliminaires d'un dispositif de télédétection compte tenu de toutes les variables ou des variables d'influence les plus importantes seulement

Hauteur	Classes de précision	
	Compte tenu de toutes les variables	Compte tenu seulement des variables d'influence importantes
[m]	[-]	[-]
135	8,6	3,2
104	7,1	3,6
72	9,7	4,3

Pour calculer la classe de précision finale, la classe de précision préliminaire doit être divisée par $\sqrt{2}$. Les impacts maximaux calculés au Tableau L.6 sont valides en partant de l'hypothèse

que l'essai de vérification de performance du RSD a été réalisé à l'un des extrêmes des plages de toutes les variables environnementales, alors que l'essai de courbe de puissance est réalisé à l'extrême opposé, ce qui est considéré comme un scénario improbable. Une hypothèse plus probable consiste à considérer que les variables x lors des deux mesures sont proches du centre de la plage maximale, avec un écart maximal égal à la moitié de la plage:

$$x_{\text{application}} \in \left[x_{\text{centre}} - \frac{x_{\text{range}}}{2}; x_{\text{centre}} + \frac{x_{\text{range}}}{2} \right]$$

$$x_{\text{verification\_test}} \in \left[x_{\text{centre}} - \frac{x_{\text{range}}}{2}; x_{\text{centre}} + \frac{x_{\text{range}}}{2} \right]$$
(L.4)

Si les conditions lors de la vérification de performance et de l'essai de courbe de puissance sont considérées comme indépendantes les unes des autres, les écarts des variables environnementales présentent les plages maximales:

$$d(x_{\text{application}} - x_{\text{verification\_test}}) = \sqrt{\left(\frac{x_{\text{range}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{x_{\text{range}}}{2}\right)^2} = \frac{x_{\text{range}}}{\sqrt{2}}$$
(L.5)

Les classes de précision obtenues concernant l'influence des variables données en exemple au Tableau L.6 sont présentées au Tableau L.8.

Tableau L.8 – Exemple de classes finales de précision d'un dispositif de télédétection

Hauteur	Classe de précision finale
[m]	[-]
135	2,3
104	2,5
72	3,0

L.2.8 Critères d'acceptation

L'essai de classification doit être réalisé sur au moins deux types spécifiques de dispositifs de télédétection et sur au moins deux sites distincts. Cela permet de procéder à une classification spécifique au type, à condition que les résultats de ces essais soient suffisamment convergents. Au moins l'un des dispositifs d'essai doit être soumis à l'essai sur deux sites différents, au moins trois essais étant donc exigés pour obtenir la classification de type.

Si les résultats divergent trop, une unité individuelle peut être retirée, sur l'hypothèse qu'elle présente une défaillance et qu'elle n'est donc pas représentative du type d'instrument. Le retrait d'une unité pour ce motif fait l'objet des exigences formulées ci-dessus concernant le nombre minimal d'unités individuelles soumises à l'essai pour établir une classification spécifique au type. Une classification spécifique au type ne peut pas être réalisée si le retrait des unités au motif qu'elles ne fonctionnent pas correctement se traduit par un nombre insuffisant d'unités soumises à l'essai. Si des unités sont retirées, il convient de tenir compte du nombre d'unités retirées comparé au nombre accepté comme étant représentatif. La raison du retrait d'une unité de l'essai de sensibilité doit être motivée et consignée.

Les résultats de ces classifications sont considérés comme suffisamment convergents si l'ordre de grandeur de l'impact des variables environnementales examinées est cohérent entre les différents essais de classification (pour chaque variable indépendante significative, par exemple, l'amplitude de la sensibilité déduite de chaque essai individuel ne diffère pas de plus de 50 % par rapport à la valeur moyenne).

L.2.9 Classification du RSD

La classe est déterminée à partir d'au moins trois essais de classification (2 unités au même emplacement et une unité à 2 emplacements différents).

Il convient d'utiliser la pente de sensibilité finale de l'Equation (L.7) pour calculer l'incertitude. Les pentes finales résultent de la combinaison des pentes obtenues à la suite des différents essais de classification, comme suit:

- a) il convient de prendre en compte toutes les variables indépendantes significatives issues de chaque essai de classification (c'est-à-dire que si une variable s'est révélée significative et indépendante dans un essai sur trois, il convient de la prendre en compte dans la classe finale);
- b) pour toutes les variables indépendantes significatives:
 - 1) interpoler la pente à la hauteur observée pour chaque essai de classification,
 - 2) combiner les pentes à partir des différents essais de classification à l'aide de l'Equation (L.3).

L.3 Vérification des performances des dispositifs de télédétection

Les mesures acquises par le dispositif de télédétection doivent être étalonnées par rapport aux mesures concurrentes et colocalisées des mêmes paramètres d'écoulement du vent acquis par les capteurs de référence montés sur le mât météorologique et qui auraient été considérés comme étant conformes pour procéder à un essai de courbe de puissance. Selon l'utilisation du dispositif de télédétection dans le cadre de la campagne d'essai de courbe de puissance, la précision doit être évaluée par rapport aux mêmes paramètres de sortie du dispositif de télédétection pris en compte lors de l'essai de classification et qui sont pertinents pour l'essai de la courbe de puissance.

L'étalonnage doit être réalisé dans un délai d'un an avant le début de l'essai de courbe de puissance (ou lors de l'essai de performance de puissance), pour que ses résultats soient toujours considérés comme étant valides par rapport à l'essai de courbe de puissance dans lequel le dispositif de télédétection est en cours de déploiement.

Concernant l'acquisition de données et la préparation des données, l'essai d'étalonnage est réalisé de la même manière que l'analyse de sensibilité (voir L.2.2 et L.2.3), à la différence que le critère L.2.2 e) est assoupli, de sorte qu'il est suffisant d'acquérir 180 h de données. Les exigences en matière de hauteurs des capteurs de référence décrits en L.2.2 en relation avec les essais de classification s'appliquent également aux essais de vérification.

Une procédure de moyennage sur la tranche doit être utilisée pour comparer les mesures acquises à l'aide du dispositif de télédétection et des capteurs de référence. L'écart par tranche entre la mesure du dispositif de télédétection et celle du capteur de référence est considéré comme le résultat essentiel. La largeur et le centre des tranches doivent être comme suit⁴¹:

- a) des tranches de vitesse du vent de référence de 0,5 m/s centrées sur des entiers multiples de 0,5 m/s doivent être appliquées pour la comparaison des vitesses horizontales du vent et la comparaison des valeurs d'écart-type de la vitesse horizontale du vent;
- b) des tranches de direction du vent de 5° centrées sur des entiers multiples de 5° doivent être appliquées pour comparer les directions du vent.

Les données brutes, exprimées sous forme de moyennes sur 10 min, doivent être présentées sous la forme d'un diagramme de dispersion des mesures acquises par le dispositif de télédétection par rapport à celles acquises par le capteur de référence. De plus, les écarts entre les mesures du dispositif de télédétection et les mesures de référence doivent être tracés en fonction des mesures de référence. Cela doit apparaître sur le même tracé, dont un exemple est donné à la Figure L.5. Pour le premier diagramme de dispersion, le coefficient de corrélation doit être calculé. Pour le second diagramme de dispersion, la valeur moyenne et l'écart-type des écarts doivent être calculés. Pour les deux diagrammes de dispersion, les valeurs moyennes et les écarts-types par tranche de la variable dépendante doivent être calculés (Tableau L.9).

Les moyennes de tranche des mesures du dispositif de télédétection doivent être tracées en fonction des moyennes de tranche des mesures du capteur de référence (Figure L.6). Une régression linéaire par la méthode des moindres carrés (OLS) à deux paramètres doit être tracée, passant par les points de données se trouvant dans la plage de vitesse du vent de référence comprise entre 4 m/s et 16 m/s (valeurs extrêmes incluses).

L'incertitude totale du dispositif de télédétection résultant de l'essai d'étalonnage doit être évaluée conformément à L.4.3 (Figure L.6, Tableau L.9). Les écarts moyennés par tranche des mesures du RSD et des mesures de référence doivent être comparés à l'incertitude-type de l'essai d'étalonnage, corrigée des écarts moyennés par tranche donnés par l'expression suivante, dans laquelle toutes les composantes présentent des unités cohérentes:

$$\sqrt{u_{\text{ver},i}^2 - (\bar{V}_{\text{RSD},i} - \bar{V}_{\text{Ref},i})^2}$$

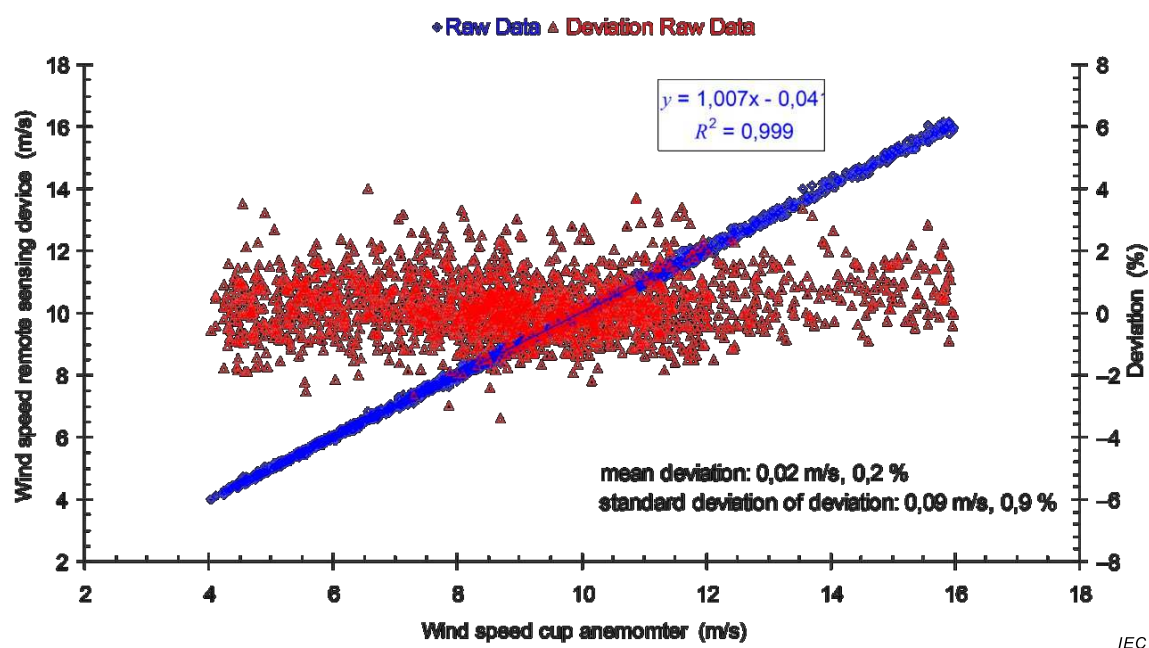
où

- $\bar{V}_{\text{RSD},i}$ est la moyenne de tranche du RSD lors de l'essai d'étalonnage dans la tranche i ;
- $\bar{V}_{\text{Ref},i}$ est la moyenne de tranche de la mesure de référence lors de l'essai d'étalonnage dans la tranche i ;
- $u_{\text{ver},i}$ est l'incertitude-type de l'essai d'étalonnage dans la tranche i conformément à L.4.3.

Les mesures de la vitesse du vent du RSD peuvent être corrigées selon les résultats de l'essai d'étalonnage afin d'éliminer la polarisation. Ce type de correction est recommandé si les écarts moyennés par tranche dépassent l'expression ci-dessus (au moins dans une

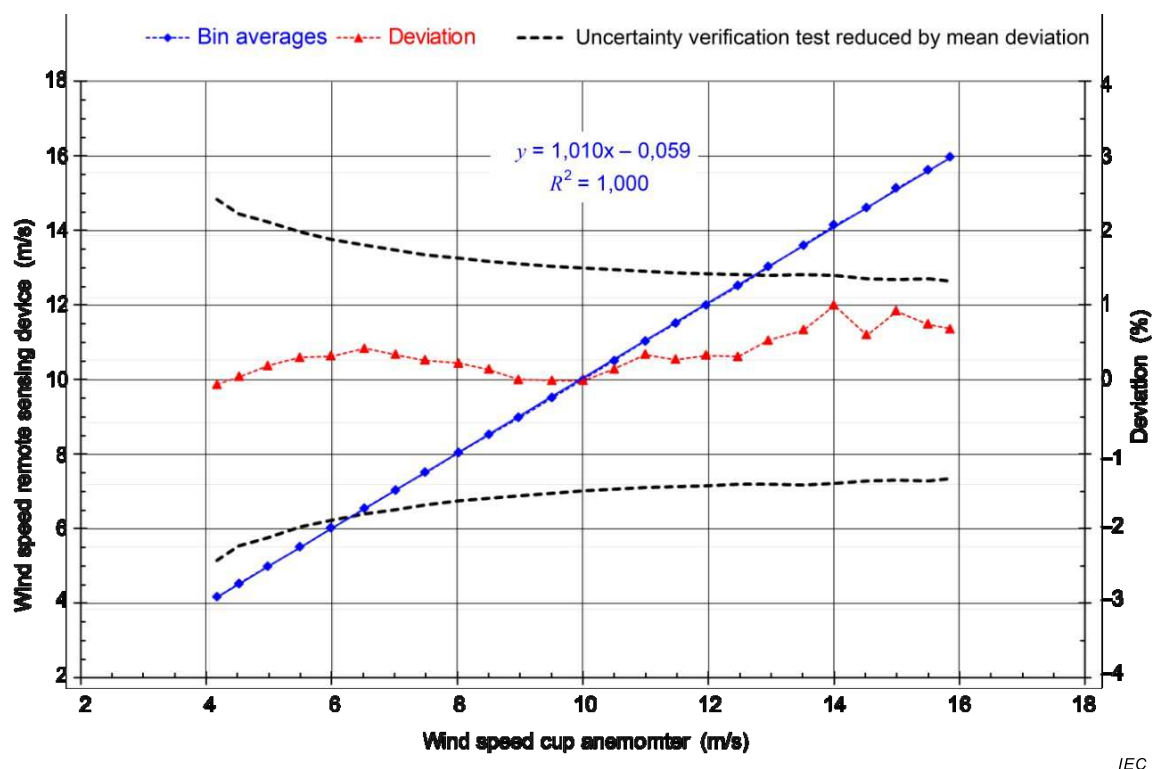
⁴¹ Dans le contexte d'autres applications du dispositif de télédétection, il peut être souhaitable de comparer des paramètres autres que ceux répertoriés. Par exemple, des tranches de 0,1 m/s peuvent être utilisées pour la comparaison des vitesses verticales du vent et la comparaison des écarts-types de vitesse horizontale du vent, centrées sur des entiers multiples de 0,1 m/s, alors que des tranches de 1 % (0,01) peuvent être utilisées pour la comparaison des intensités des turbulences, centrées sur des entiers multiples de 1 % (0,01).

tranche). La correction de vitesse du vent peut être composée d'une régression linéaire des mesures du capteur de référence moyennées par tranche par rapport aux mesures du RSD.



Anglais	Français
Raw data	Données brutes
Deviation raw data	Données brutes d'écart
Wind speed remote sensing device [m/s]	Vitesse du vent mesurée par un dispositif de télédétection [m/s]
Mean deviation: 2,02 m/s, 0,2 %	Ecart moyen: 2,02 m/s, 0,2 %
Standard deviation of deviation: 0,0 m/s, 0,9 %	Ecart-type de l'écart: 0,0 m/s, 0,9 %
Wind speed cup anemometer [m/s]	Vitesse du vent mesurée par un anémomètre à coupelles [m/s]
Deviation [%]	Ecart [%]

Figure L.5 – Comparaison des moyennes sur 10 min de la composante de vitesse horizontale du vent mesurée par un dispositif de télédétection et par un anémomètre à coupelles



IEC

Anglais	Français
Bin averages	Moyennes des tranches
Deviation	Ecart
Uncertainty verification test reduced by mean deviation	Essai de vérification de l'incertitude diminué de l'écart moyen
Wind speed remote sensing device [m/s]	Vitesse du vent mesurée par un dispositif de télédétection [m/s]
Wind speed cup anemometer [m/s]	Vitesse du vent mesurée par un anémomètre à coupelles [m/s]
Deviation [%]	Ecart [%]

Figure L.6 – Comparaison par tranche de la mesure de la composante de vitesse horizontale du vent par un dispositif de télédétection et par un anémomètre à coupelles

Il convient également de tenir compte des considérations formulées en L.2.4 dans le contexte des essais d'étalonnage par rapport aux erreurs et sensibilités détectées lors des essais de classification, qui sont les artefacts d'une configuration incorrecte du dispositif de télédétection, notamment l'introduction d'erreurs et de sensibilités dues au cisaillement du vent à la suite d'une attribution incorrecte des hauteurs de mesure (voir Référence [10]).

L.4 Evaluation de l'incertitude des mesures des dispositifs de télédétection

L.4.1 Généralités

Les composants suivants doivent être pris en compte pour évaluer l'incertitude des mesures avec des dispositifs de télédétection:

- l'incertitude résultant de l'essai d'étalonnage du RSD, conformément à L.4.3;
- l'incertitude résultant de la classification du dispositif de télédétection, conformément à L.4.4;
- l'incertitude due à l'écoulement non homogène dans le volume de mesure du dispositif de télédétection, conformément à L.4.5;
- l'incertitude due aux effets de montage du dispositif de télédétection, conformément à L.4.6;

- e) l'incertitude due à la variation de l'écoulement sur le site d'essai de courbe de puissance, conformément à L.4.7;
- f) une incertitude possible due aux résultats imprévus de la surveillance de la précision du dispositif de télédétection sur le site d'application, conformément à l'Article L.5.

Il doit être pris pour hypothèse que les différentes composantes d'incertitude sont indépendantes les unes des autres et doivent être ajoutées dans la quadrature.

L.4.2 Incertitude de référence

Les composantes d'incertitude suivantes sont prises en compte pour l'évaluation de l'incertitude-type du capteur de référence (dans le cas d'un anémomètre à coupelles); elles doivent être considérées comme étant indépendantes les unes des autres, et doivent donc être ajoutées dans la quadrature:

- a) l'étalonnage de la soufflerie;
- b) les effets de l'anémomètre à coupelles selon la classification de l'anémomètre;
- c) les effets du montage de l'anémomètre à coupelles;
- d) l'incertitude des corrections de mâât météorologique appliquées aux mesures de l'anémomètre à coupelles de référence;
- e) l'incertitude du système d'acquisition de données de l'instrument de référence pour la vitesse du vent dans la tranche *i*.

L.4.3 Incertitude résultant de l'essai d'étalonnage du RSD

Les mesures du dispositif de télédétection sont liées aux incertitudes systématiques suivantes (incertitudes de catégorie B) résultant de l'essai d'étalonnage, qui doivent être calculées pour chaque tranche de mesure du dispositif de télédétection:

- a) l'incertitude-type du capteur de référence conformément à L.4.2;
- b) l'écart moyen des mesures du dispositif de télédétection et des mesures du capteur de référence. Si une correction de la mesure du dispositif de télédétection est apportée, l'écart moyen entre les mesures corrigées du dispositif de télédétection et les mesures du capteur de référence est évalué;
- c) l'incertitude-type de la mesure du dispositif de télédétection calculée comme étant l'écart-type des mesures divisé par la racine carrée du nombre d'enregistrements de données par tranche (incertitude de catégorie A de l'essai d'étalonnage);
- d) l'incertitude du dispositif de télédétection due aux effets de montage lors de l'essai d'étalonnage;
- e) l'incertitude du dispositif de télédétection due à l'écoulement non homogène dans le volume de mesure lors de l'essai d'étalonnage, conformément à L.4.5.

Les effets sur site peuvent être considérés comme une incertitude supplémentaire si la distance qui sépare le dispositif de télédétection du mâât météorologique de référence est suffisante pour compromettre la conformité au point L.2.2 d). En particulier, une incertitude supplémentaire dans la vitesse du vent de 1 % multipliée par la distance de séparation divisée par la hauteur de mesure doit être appliquée. La distance de séparation est la distance entre le centroïde du volume de mesure et le capteur de référence utilisé pour l'essai. La hauteur de mesure est la hauteur à laquelle la comparaison entre le capteur de référence et le dispositif de télédétection est réalisée. Il ne s'agit pas de la hauteur du moyeu ni de celle du diamètre du rotor de l'éolienne à l'essai, lesquelles peuvent être inconnues au moment de l'essai de classification ou de l'essai d'étalonnage. Les incertitudes supplémentaires liées à des problèmes similaires soulevés lors de l'essai de courbe de puissance en raison de la distance entre le dispositif de télédétection et l'éolienne à l'essai sont présentées en L.4.7.

Les incertitudes du système d'acquisition de données du dispositif de téledétection sont automatiquement intégrées dans les résultats de l'essai d'étalonnage et ne doivent pas être considérées comme des incertitudes supplémentaires.

Il doit être pris pour hypothèse que les différentes composantes d'incertitude sont indépendantes les unes des autres et doivent être ajoutées dans la quadrature pour chaque tranche de vitesse du vent. Un exemple est montré dans le Tableau L.9. L'incertitude de catégorie B totale des mesures du dispositif de télé-détection résultant de l'essai d'étalonnage doit être prise en compte comme étant l'incertitude de catégorie B de l'essai de courbe de puissance dans tous les cas.

Tableau L.9 – Exemple de calculs d'incertitude découlant de l'étalonnage d'un dispositif de télédétection (RSD) en termes d'incertitudes systématiques

V_{cup}	V_{RSD}	Nombre d'ensembles de données	V_{RSD} max	V_{RSD} min	V_{RSD} std	V_{RSD} std/ $\sqrt{n}$	Ecart moyen	Incertitude V_{cup}	Incertitude de montage du RSD	Incertitude V_{RSD}
[m/s]	[m/s]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]
4,133	4,148	15	4,30	4,00	0,090	0,023	0,4	2,3	0,5	2,4
4,528	4,525	33	4,85	4,28	0,139	0,024	0,0	2,2	0,5	2,3
5,064	5,086	26	5,31	4,74	0,141	0,028	0,4	2,0	0,5	2,2
5,538	5,593	47	5,92	5,28	0,166	0,024	1,0	1,9	0,5	2,2
5,985	6,025	44	6,27	5,72	0,141	0,021	0,7	1,9	0,5	2,0
6,513	6,546	45	6,80	6,26	0,158	0,024	0,5	1,8	0,5	1,9
6,995	7,019	87	7,33	6,73	0,151	0,016	0,3	1,7	0,5	1,8
7,500	7,501	109	7,83	7,14	0,156	0,015	0,0	1,7	0,5	1,7
8,010	8,013	118	8,41	7,69	0,160	0,015	0,0	1,6	0,5	1,6
8,512	8,537	145	8,97	8,22	0,183	0,015	0,3	1,6	0,5	1,6
8,993	9,033	146	9,45	8,71	0,176	0,015	0,4	1,5	0,5	1,6
9,498	9,554	121	9,97	9,16	0,171	0,016	0,6	1,5	0,5	1,6
10,008	10,059	166	10,57	9,63	0,181	0,014	0,5	1,5	0,5	1,6
10,506	10,536	106	10,91	10,25	0,141	0,014	0,3	1,5	0,5	1,5
11,003	11,037	78	11,52	10,68	0,185	0,021	0,3	1,4	0,5	1,5
11,502	11,510	59	11,92	11,13	0,188	0,025	0,1	1,4	0,5	1,4
12,000	12,035	63	12,62	11,68	0,217	0,027	0,3	1,4	0,5	1,5
12,519	12,521	68	12,97	12,15	0,182	0,022	0,0	1,4	0,5	1,4
12,957	12,998	64	13,40	12,64	0,186	0,023	0,3	1,4	0,5	1,4
13,469	13,470	40	13,87	13,17	0,177	0,028	0,0	1,4	0,5	1,4
14,011	14,014	25	14,36	13,67	0,192	0,038	0,0	1,3	0,5	1,4
14,444	14,490	30	14,83	14,21	0,172	0,031	0,3	1,3	0,5	1,4
14,983	14,951	14	15,48	14,62	0,246	0,066	-0,2	1,3	0,5	1,4
15,509	15,585	17	15,92	15,38	0,135	0,033	0,5	1,3	0,5	1,4
15,990	16,038	16	16,24	15,77	0,130	0,032	0,3	1,3	0,5	1,4
16,475	16,479	10	16,69	16,22	0,149	0,047	0,0	1,3	0,5	1,3
17,066	17,140	12	17,50	16,75	0,227	0,065	0,4	1,3	0,5	1,4
17,515	17,682	13	17,91	17,44	0,153	0,042	1,0	1,3	0,5	1,6
18,001	18,020	8	18,32	17,82	0,157	0,056	0,1	1,3	0,5	1,3
18,430	18,549	13	18,82	18,25	0,173	0,048	0,6	1,3	0,5	1,5
18,849	18,980	4	19,16	18,80	0,149	0,075	0,7	1,3	0,5	1,5
19,415	19,430	3	19,67	19,23	0,223	0,129	0,1	1,3	0,5	1,4

Il est à souligner que l'incertitude-type statistique de la mesure d'un dispositif de télédétection par rapport aux seules moyennes sur 10 min d'une variable mesurée à la suite de l'essai d'étalonnage est donnée par l'écart-type des écarts des mesures du dispositif de télédétection et du capteur de référence. Cette incertitude est nettement supérieure à l'incertitude statistique des moyennes par tranche de l'essai d'étalonnage décrit au point c) ci-dessus. Toutefois, l'incertitude statistique des seules moyennes sur 10 min est automatiquement incluse dans l'incertitude de catégorie A des moyennes de tranche de la courbe de puissance évaluée. Elle ne doit donc pas être prise en compte par d'autres moyens.

L.4.4 Incertitude due à la classification du dispositif de télédétection

La sensibilité du dispositif due à diverses conditions introduit une incertitude étant donné que les conditions météorologiques lors de l'application du capteur de télédétection peuvent être différentes de celles présentes au moment de l'essai d'étalonnage. L'incertitude-type découlant de la classe de précision (voir L.2.7) est le numéro de classe de précision final divisé par $\sqrt{3}$.

La classe de précision selon L.2.7 représente l'erreur de mesure maximale du dispositif de télédétection due à l'impact des conditions environnementales dans chaque période de 10 min (après l'essai d'étalonnage associé). Cette incertitude inclut les incertitudes dues à une variation des variables environnementales autour de ses valeurs moyennes présentes lors de l'essai de courbe de puissance dans chaque tranche de vitesse du vent. Toutefois, l'incertitude due à cette variation des variables environnementales lors de l'essai de courbe de puissance est de nature statistique et est totalement reflétée dans l'incertitude de catégorie A des moyennes de tranche de la courbe de puissance (incertitude de catégorie A de la courbe de puissance). Il convient donc de ne pas la considérer comme une incertitude de catégorie B de la mesure de la vitesse du vent. Il convient que l'incertitude de catégorie B de la mesure de la vitesse du vent due à l'impact des variables environnementales sur les performances du dispositif de télédétection ne tienne compte que des écarts de valeurs moyennes des variables environnementales lors de l'essai d'étalonnage et de l'essai de courbe de puissance. Il convient de les calculer comme suit pour chaque tranche de vitesse du vent:

$$u_{VR,class,i} = v_i \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{m_j}{100} \cdot |\bar{x}_{PC,j,i} - \bar{x}_{ver,j,i}| \right)^2} \quad (L.6)$$

où

- $u_{VR,class,i}$ est l'incertitude-type de catégorie B de mesure de la vitesse du vent dans la tranche de vitesse du vent i due à l'impact des variables environnementales sur les performances du dispositif de télédétection;
- M est le nombre de variables environnementales réputées avoir une influence significative sur la précision du dispositif de télédétection selon l'essai de classification;
- m_j est la pente qui décrit la sensibilité de la mesure de la vitesse du vent du dispositif de télédétection sur la variable environnementale j obtenue de la combinaison de résultats de 3 essais de classification au moins;
- $\bar{x}_{PC,j,i}$ est la valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de l'essai de courbe de puissance;
- $\bar{x}_{ver,j,i}$ est la valeur moyenne de la variable environnementale j dans la tranche de vitesse du vent i présente lors de l'essai d'étalonnage sur le dispositif de télédétection.

Pour les variables environnementales pertinentes non mesurées lors de l'essai de courbe de puissance, la plage maximale de ladite variable présente lors de l'essai de courbe de puissance doit être estimée, et l'écart des valeurs moyennes des variables environnementales

lors de l'essai de courbe de puissance et de l'essai d'étalonnage dans l'équation ci-dessus doit être remplacé par l'écart absolu maximal prévu de ladite variable présent lors de l'essai de courbe de puissance par rapport à sa valeur moyenne utilisée lors de l'essai d'étalonnage divisée par $\sqrt{3}$. Toutefois, l'écart de classification s'appuyant sur l'hypothèse d'une réponse linéaire aux perturbations dans les variables indépendantes, dont les valeurs maximales et minimales lors de l'essai de courbe de puissance ou de l'essai d'étalonnage dépassent les plages obtenues lors des essais de sensibilité de classification, il convient de faire attention lors de l'interprétation du résultat d'incertitude de classification. Si l'essai d'étalonnage intègre les mêmes données que l'essai de courbe de puissance, l'incertitude selon L.4.4 devient nulle.

L.4.5 Incertitude due à l'écoulement non homogène dans le volume de mesure

La plupart des dispositifs de télédétection du vent impliquent de prendre pour hypothèse que les conditions de vent sont équivalentes entre les zones du volume de mesure présentant une séparation spatiale significative. Cette hypothèse peut être rejetée dans un terrain complexe. Même si le terrain n'est pas considéré comme étant complexe conformément à la présente norme, des erreurs significatives peuvent se produire en raison de la non-homogénéité de l'écoulement. L'incertitude liée à l'hypothèse de conditions de vent équivalentes dans des volumes de sonde séparés dans l'espace doit être évaluée. Il convient de soumettre les dispositifs de télédétection à une analyse approfondie et rigoureuse par rapport à l'impact de l'écoulement non uniforme sur les polarisations de mesure en ce qui concerne leur configuration particulière.

Par exemple, la combinaison d'un modèle d'écoulement adapté et d'un modèle reproduisant l'algorithme d'extraction de la vitesse horizontale du vent du dispositif de télédétection peut être utilisée pour évaluer l'incertitude due à l'écoulement non homogène.

Une alternative simplifiée permettant d'estimer cette incertitude, applicable à la plupart des systèmes monostatiques mis en œuvre par les observations de l'effet Doppler, est donnée par la méthode de Bingöl et al., référence [11], avec des extensions par Albers et al., référence [12].

Il convient que l'utilisateur consulte le fabricant du dispositif de télédétection pour connaître la meilleure manière d'évaluer l'incertitude du dispositif spécifique sur le site d'essai.

L.4.6 Incertitude due aux effets de montage

L'incertitude du dispositif de télédétection due à un nivellement non idéal du dispositif doit être estimée. L'incertitude dépend fortement du type d'instrument utilisé.

L.4.7 Incertitude due à la variation de l'écoulement sur le site

La même incertitude que dans l'application d'un mâât doit être prise pour hypothèse pour cette incertitude, c'est-à-dire une incertitude-type de 2 % en termes de composante de vitesse horizontale du vent pour une plage de distances de 2 à 3 diamètres de rotor, et une incertitude-type de 3 % pour une plage de distances de plus de 3 diamètres de rotor. Lorsqu'un RSD est utilisé, c'est la distance horizontale entre le centre du volume d'essai du RSD et la position de l'éolienne en essai qui doit être prise en compte.

L.5 Contrôles supplémentaires

L.5.1 Surveillance de la performance du dispositif de télédétection sur le site d'application

Un mâât météorologique d'au moins 40 m ou la hauteur de l'extrémité inférieure de l'éolienne soumise à l'essai doit être appliqué(e) lors de l'essai de courbe de puissance pour surveiller les performances du dispositif de télédétection. Le montage du mâât météorologique et du dispositif de télédétection, ainsi que la préparation des données, doivent satisfaire aux

exigences décrites en L.2.2 et L.2.3, sauf que le mât météorologique est relativement peu élevé et qu'il peut être équipé de capteurs de référence uniquement en son sommet. Les données doivent être analysées conformément à L.5.1 et à L.5.3.

L.5.2 Identification du dysfonctionnement du dispositif de télédétection

Les tracés de chronogramme des mesures du vent (vitesse du vent et direction du vent) réalisés avec le mât météorologique doivent être comparés à ceux des mesures du vent respectives du dispositif de télédétection. De plus, les diagrammes de dispersion des mesures de la vitesse du vent et de la direction du vent du dispositif de télédétection par rapport aux mesures respectives réalisées avec le mât météorologique doivent être examinés. Les périodes de données aberrantes ou d'autres anomalies évidentes doivent être exclues de l'essai de courbe de puissance.

L.5.3 Contrôle de cohérence de l'évaluation des incertitudes systématiques du dispositif de télédétection

Il est à noter que le présent paragraphe ne s'applique pas si l'étalonnage du RSD a lieu en même temps que la mesure de performance de puissance. La comparaison et l'analyse des mesures du dispositif de télédétection et des capteurs de référence aux hauteurs de mesure communes, lorsqu'elles sont réalisées dans le cadre d'un essai d'étalonnage conformément à l'Article L.3, doivent être répétées avec le mât météorologique sur le site d'essai de courbe de puissance pendant toute la durée de la période de mesure de la courbe de puissance. Il est prévu que la valeur absolue de l'écart moyen des mesures du dispositif de télédétection et du capteur de référence par tranche de vitesse du vent lors de l'essai de courbe de puissance ne dépasse pas la racine carrée de la somme des carrés des composantes d'incertitude suivantes:

- a) l'incertitude-type de catégorie B de la mesure du dispositif de télédétection résultant de l'essai d'étalonnage réalisé avant l'essai de courbe de puissance, évaluée en totale conformité avec L.4.3;
- b) les effets systématiques des variables environnementales sur les performances du dispositif de télédétection lors de l'essai de courbe de puissance, évalués conformément à l'équation donnée en L.4.4, en ne tenant compte que des écarts moyens des variables environnementales d'influence lors de l'essai de courbe de puissance et de la mesure d'étalonnage qui le précède.

Si la valeur absolue de l'écart moyen des mesures du dispositif de télédétection et du capteur de référence dépasse cette prévision dans une certaine tranche de vitesse du vent, la différence entre l'écart vrai et l'écart prévu est considérée comme une composante d'incertitude de catégorie B supplémentaire de la mesure du dispositif de télédétection lors de l'essai de courbe de puissance dans ladite tranche de vitesse du vent. Pour les hauteurs de mesure du dispositif de télédétection non capturées par le mât météorologique sur le site d'essai de courbe de puissance, cette incertitude supplémentaire doit être calculée comme suit:

$$u_{\text{added\_systematic},j,i} = u_{\text{added\_systematic},1,i} \frac{u_{\text{systematic},j,i}}{u_{\text{systematic},1,i}} \quad (\text{L.7})$$

où

- $u_{\text{added\_systematic},j,i}$ est l'incertitude-type ajoutée de catégorie B à la hauteur de mesure j (non couverte par le mât météorologique);
- $u_{\text{added\_systematic},1,i}$ est l'incertitude ajoutée de catégorie B à la hauteur de la tête du mât météorologique;
- $u_{\text{systematic},j,i}$ sont les autres incertitudes cumulées de catégorie B du dispositif de télédétection à la hauteur j ;
- $u_{\text{systematic},1,i}$ sont les autres incertitudes cumulées de catégorie B du dispositif de télédétection à la hauteur de la tête du mât météorologique.

L'incertitude de mesure ajoutée de catégorie B doit être cumulée aux autres incertitudes de catégorie B des mesures du dispositif de télédétection dans la quadrature.

L.5.4 Essai in situ du dispositif de télédétection

Pour vérifier la cohérence de la précision des mesures du dispositif de télédétection tout au long de la campagne de mesure de la courbe de puissance, le mât météorologique présent sur le site d'essai peut être utilisé pour procéder à un essai in situ du dispositif de télédétection, s'apparentant à l'essai in situ défini à l'Annexe K. Si un essai in situ est réalisé, il doit l'être pour toutes les hauteurs de mesure communes couvertes par le mât météorologique et le dispositif de télédétection.

Un essai in situ réussi peut remplacer une répétition de l'essai d'étalonnage après l'essai de courbe de puissance.

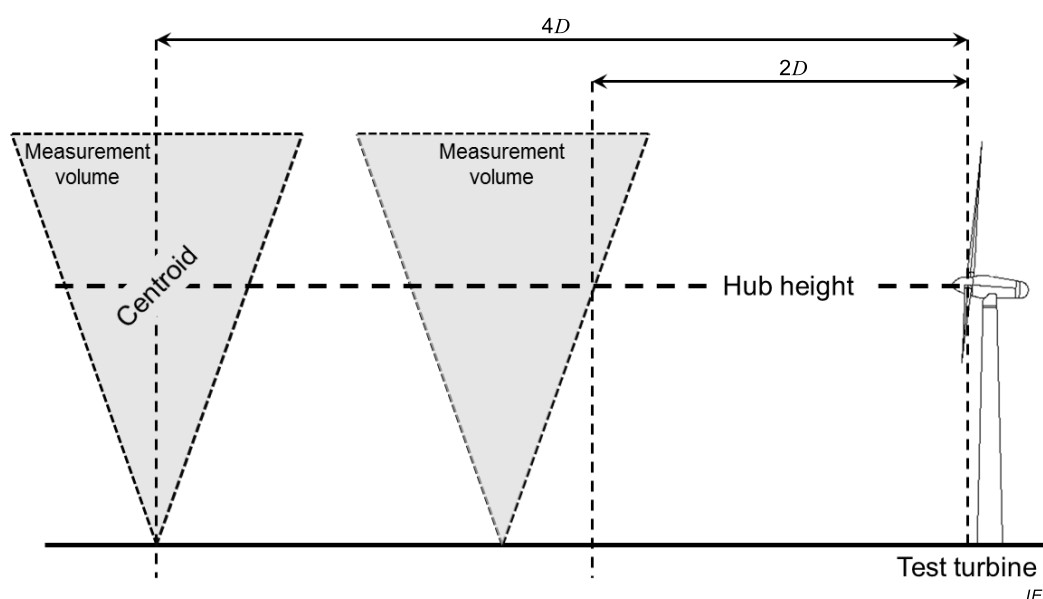
L.6 Autres exigences spécifiques à l'essai de courbe de puissance

Avant d'utiliser le dispositif de télédétection pour les mesures de la courbe de puissance, un essai de classification conforme à l'Article L.2 et un essai d'étalonnage conforme à l'Article L.3 doivent être réalisés. Par ailleurs, l'essai d'étalonnage peut être réalisé lors de l'essai de courbe de puissance. Si l'essai d'étalonnage n'est pas réalisé sur le site d'essai de courbe de puissance, le dispositif de télédétection doit être stocké ou doit être directement acheminé vers l'emplacement où doit avoir lieu la campagne de courbe de puissance à l'issue de l'essai d'étalonnage. L'essai d'étalonnage doit être répété après l'essai de courbe de puissance. D'autre part, un essai in situ du dispositif de télédétection par rapport au mât météorologique présent sur le site d'essai de courbe de puissance peut être réalisé. Les écarts de méthodologie d'essai d'étalonnage qu'implique l'essai *in situ* doivent être traités comme les écarts des étalonnages d'anémomètre à coupelles définis dans la présente norme.

Si une hauteur de mesure exigée pour l'essai de courbe de puissance est comprise entre deux hauteurs de mesure disponibles depuis l'essai d'étalonnage ou l'essai de classification, une interpolation linéaire des résultats de l'essai d'étalonnage ou de l'essai de classification en fonction de la hauteur doit être réalisée. Il convient de ne pas extrapoler de façon linéaire⁴² les résultats de l'essai d'étalonnage ou de l'essai de classification. Si les mesures exigées pour le calcul de la vitesse du vent équivalente du rotor dépassent la plage de hauteurs couverte par l'essai d'étalonnage ou l'essai de classification, une incertitude supérieure à celle dépendant de la hauteur la plus proche couverte par l'essai d'étalonnage ou l'essai de classification doit être prise en compte.

Dans certains cas, il est utile de procéder à un étalonnage du site sur un terrain suffisamment peu complexe pour satisfaire aux exigences de l'Annexe B. Si le dispositif de télédétection est utilisé conjointement avec une mesure de l'étalonnage du site, le volume de mesure doit être centré horizontalement à 10 m près ou 10 % de la hauteur du moyeu H du mât météorologique de référence, selon la valeur la plus importante. Si un étalonnage du site n'est pas exigé, le dispositif de télédétection peut être placé conformément aux exigences de 6.3.2. Dans les deux cas, lors de l'acquisition des mesures de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, les extrêmes du volume de mesure à la hauteur du moyeu H ne doivent pas être plus proches de l'éolienne à l'essai que la distance $2D$, où D est le diamètre du rotor, et le centroïde du volume de mesure ne doit pas être à une distance supérieure à $4D$ par rapport à l'éolienne à l'essai. Cela est présenté à la Figure L.7, dans laquelle une géométrie de balayage conique inversé est utilisée à titre d'exemple uniquement: cette ligne directrice ne se limite pas à cette géométrie de balayage particulière. Les extrêmes du volume de mesure à toutes les hauteurs évaluées pour l'essai de courbe de puissance doivent se trouver à l'extérieur d'une sphère centrée sur la position et la hauteur du moyeu d'une éolienne de rayon égal à 2 diamètres de rotor de l'éolienne respective.

⁴² D'autres types d'extrapolation sont admis tant qu'ils sont prudents.



Anglais	Français
Measurement volume	Volume de mesure
Centroid	Centroïde
Hub height	Hauteur du moyeu
Test turbine	Eolienne d'essai

Figure L.7 – Exemple de placement admissible du volume de mesure

Les volumes de sonde dans lesquels le dispositif de télédétection acquiert une mesure de vitesse radiale ne doivent être soumis à aucun sillage et à aucune perturbation de l'écoulement dû aux éoliennes et aux obstacles décrits à l'Annexe A. Pour plus de clarté:

- le volume de mesure est la zone dans laquelle les caractéristiques d'écoulement du vent peuvent influencer une mesure de la vitesse du vent, et est défini par la géométrie de balayage, la configuration du dispositif ou l'agencement des multiples faisceaux qui pénètrent dans le volume afin d'acquérir cette mesure;
- le volume de sonde est la zone à partir de laquelle une seule mesure physique constituante du décalage Doppler, de la vitesse radiale ou de la vitesse de vue linéaire, par exemple, est acquise, dont plusieurs sont en général exigées pour déduire une mesure de la vitesse du vent. Le volume de sonde est une caractéristique de l'interaction physique de base du dispositif de télédétection avec l'atmosphère, plutôt que de la mesure de la vitesse du vent déduite de ces interactions, qui est déterminée par l'écoulement à l'intérieur du volume de mesure.

Il convient de procéder aux mesures spécifiques au dispositif conformément aux conseils et lignes directrices des fabricants du dispositif de télédétection utilisé. Il s'agit de satisfaire aux exigences générales en matière de hauteur de mesure.

La configuration du dispositif de télédétection, les paramètres de fonctionnement, les logiciels/micrologiciels et les composants matériels liés aux performances utilisés lors de l'essai de courbe de puissance doivent être les mêmes que ceux utilisés lors de l'essai de classification et de l'essai d'étalonnage du dispositif. Il ne doit être apporté aucune modification importante, qui pourrait affecter les performances entre l'essai d'étalonnage, de classification et de courbe de puissance.

Si le mât météorologique disponible pour l'essai de courbe de puissance n'atteint pas la hauteur du moyeu, la pression atmosphérique mesurée par les instruments du mât météorologique doit être ajustée à la hauteur du moyeu conforme à la présente norme. En outre, la température de l'air sera ajustée à la hauteur du moyeu en prenant pour hypothèse

que l'atmosphère varie conformément à l'ISO 2533:1975. Une méthode alternative consiste à monter un capteur de température sur la nacelle de l'éolienne. Le capteur doit être monté au moins un mètre (1 m) au-dessus de la nacelle et du côté exposé au vent des systèmes de ventilation existants, le cas échéant. Les effets de la nacelle sur le capteur doivent être limités conformément à l'IEC 61400-12-2.

Les mesures suivantes sont exigées pour l'essai de courbe de puissance, l'essai d'étalonnage et l'essai de classification si le dispositif de télédétection exige le filtrage des données respectives pour assurer des mesures exactes:

- a) mesure des précipitations;
- b) mesure de la hauteur des nuages;
- c) mesure du niveau de bruit acoustique ambiant.

La nécessité de ces mesures doit être raisonnablement évaluée lors de l'essai de classification.

L.7 Rapports

L.7.1 Rapport commun sur l'essai de classification, l'essai d'étalonnage et la surveillance du dispositif de télédétection lors de l'application

Les rapports relatifs à l'essai de classification, à l'essai d'étalonnage et à la surveillance du dispositif de télédétection lors de l'application doivent contenir les informations communes suivantes:

- a) tous les détails du montage de la mesure de référence et tous les détails du site d'essai, exigés dans le cadre d'un essai de courbe de puissance;
- b) tous les détails du montage du dispositif de télédétection, y compris sa position exacte, sa position relative par rapport au mât météorologique de référence, l'orientation, la version et le montage du logiciel d'exploitation, l'angle de pas et l'angle de roulis et sa surveillance;
- c) le numéro de série et le type de dispositif de télédétection;
- d) la période de mesure;
- e) la description de l'analyse de données, y compris le filtrage;
- f) la présentation des données brutes (voir l'Article L.3);
- g) l'analyse par tranche de la mesure du dispositif de télédétection par rapport à la mesure de référence, y compris la documentation graphique et tabulaire (voir l'Article L.3 et L.4.3);
- h) l'analyse de l'incertitude des mesures de référence, selon le cas (voir L.4.2);
- i) les conditions environnementales lors de l'essai restant après le filtrage de toutes les données: au moins toutes les variables ayant un impact significatif sur la précision du dispositif de télédétection résultant de l'essai de classification doivent être documentées. Chacune de ces variables doit être tracée en fonction de la vitesse du vent à la hauteur d'évaluation, et doit être moyennée par tranche par rapport à cette vitesse du vent avec une largeur de 0,5 m/s centrée sur des entiers multiples de 0,5 m/s. De plus, la répartition de ces variables doit être indiquée. Pour la surveillance des performances lors de l'essai de courbe de puissance, cette documentation se limite aux mesures disponibles des conditions environnementales;
- j) tous les certificats d'étalonnage de tous les capteurs de référence et du système d'acquisition de données.

L.7.2 Rapport supplémentaire sur l'essai de classification

Le rapport relatif à l'essai de classification doit contenir les informations suivantes, en plus de celles données en L.7.1:

- a) les diagrammes de dispersion des données sur 10 min et les moyennes de tranche liées à l'analyse de sensibilité pour toutes les variables prises en compte (voir L.2.4);
- b) la description et la justification du choix des variables environnementales prises en compte;
- c) la documentation complète du processus d'identification et d'élimination des variables environnementales non significatives;
- d) la documentation complète du processus d'examen des intercorrélations des variables environnementales prises en compte;
- e) les paramètres de sensibilité, les sensibilités, les coefficients de corrélation, les valeurs moyennes et les écarts-types de toutes les variables prises en compte (voir Article L.2);
- f) les plages de variables environnementales prises en compte pour la classification;
- g) le choix de la méthode de classification;
- h) les résultats de la classification pour les plages des paramètres définies au Tableau L.3.

L.7.3 Rapport supplémentaire sur l'essai d'étalonnage

Le rapport relatif à l'essai d'étalonnage doit contenir les informations suivantes, en plus de celles données en L.7.1:

- a) l'incertitude-type du dispositif de télédétection résultant de l'essai d'étalonnage (voir L.4.3);
- b) si l'essai d'étalonnage est répété après l'essai de courbe de puissance: la comparaison des résultats des essais d'étalonnage et les conséquences de cette comparaison;
- c) le rapport supplémentaire relatif à la surveillance du dispositif de télédétection lors de l'application;
- d) toute anomalie dans les mesures (voir L.5.2);
- e) la quantité et les périodes des données filtrées en fonction du contrôle de données (voir L.5.2);
- f) l'analyse d'incertitude (voir L.4.3 et L.4.4);
- g) la représentation par tranche des critères d'évaluation (voir L.5.3) et l'incertitude ajoutée;
- h) la période de formation et d'essai, les résultats et les conséquences de l'essai in situ, réalisé jusqu'ici.

L.7.4 Rapport supplémentaire sur l'application

Le rapport relatif à l'application doit contenir les informations suivantes, en plus de celles données en L.7.1;

- a) l'évaluation d'incertitude complète des mesures du dispositif de télédétection (voir l'Article L.4);
- b) la réalisation des mesures de masse volumique et la description des corrections de données associées apportées à la hauteur du moyeu.

Annexe M (informative)

Normalisation des données de courbe de puissance conformément à l'intensité des turbulences

M.1 Généralités

Les courbes de puissance de l'éolienne sont influencées par l'intensité des turbulences. Une partie significative de l'effet de l'intensité des turbulences est provoquée par le moyennage de la puissance de sortie mesurée et par la vitesse du vent mesurée sur des périodes de 10 min. Cet effet peut être déduit de la relation non linéaire entre la puissance de sortie et la vitesse du vent. Dans la plage de vitesses du vent pour laquelle la puissance de sortie augmente de manière proportionnelle avec la vitesse du vent (cheville de la courbe de puissance), le moyennage sur 10 min entraîne une augmentation de la puissance de sortie avec l'augmentation de l'intensité des turbulences. Cela est notamment le cas en cas de basses vitesses du vent et pour des vitesses du vent proches du coefficient de puissance maximale. Dans la plage de vitesses du vent pour laquelle la puissance de sortie augmente proportionnellement moins que la vitesse du vent (coude de la courbe de puissance), le moyennage sur 10 min entraîne une diminution de la puissance de sortie avec l'augmentation de l'intensité des turbulences. Cela est notamment le cas au niveau du coude de la courbe de puissance pour des vitesses du vent juste en dessous de la vitesse du vent assignée.

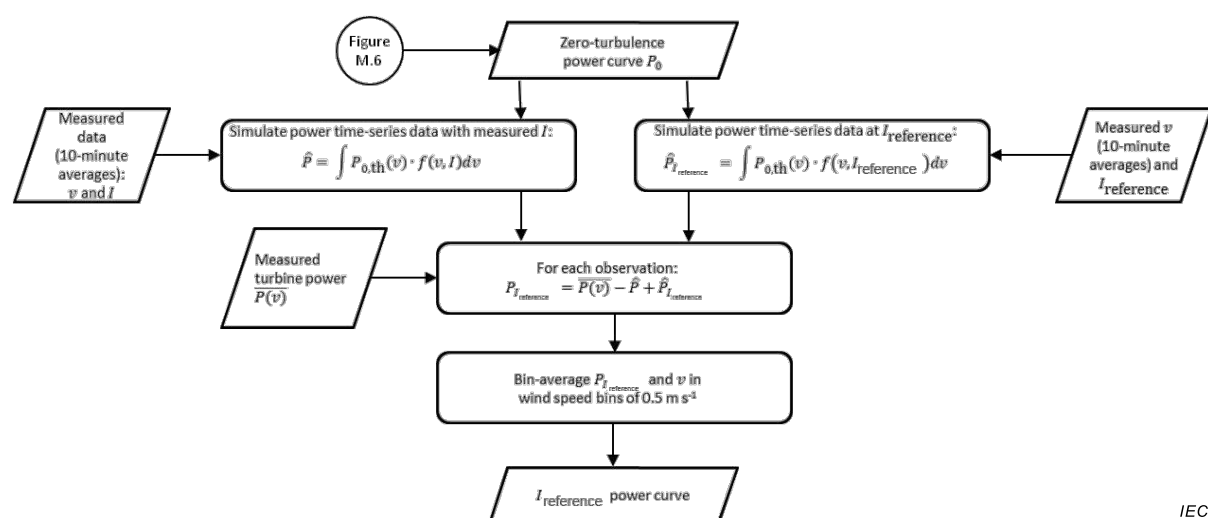
L'Annexe M décrit une procédure de normalisation des données de courbe de puissance à l'intensité des turbulences de référence (voir références [13] et [14]). L'intensité des turbulences de référence peut être définie comme une fonction de la vitesse du vent. La procédure donnée traite uniquement de l'effet du moyennage sur 10 min des données de mesure. Les autres effets des turbulences sur la puissance de sortie de l'éolienne ne sont pas couverts par cette méthode. Il est recommandé d'appliquer la procédure de normalisation des turbulences pour faciliter la comparaison entre les courbes de puissance mesurées à différentes intensités des turbulences.

La procédure de normalisation des turbulences décrite ici donne des hypothèses de simplification, par exemple que l'éolienne suit à chaque instant une courbe de puissance donnée indépendante de l'intensité des turbulences et que les fluctuations de la vitesse du vent concernant la totalité de la surface du rotor pour une période de 10 min sont correctement caractérisées par l'intensité des turbulences à la hauteur du moyeu. Malgré la simplicité de ces hypothèses, la méthode permet d'ajuster l'effet du moyennage sur 10 min à une grande diversité de types d'éoliennes, de tailles de rotors et de plages de turbulences.

Une procédure destinée à estimer les incertitudes dues aux effets des turbulences sur les courbes de puissance tant pour la normalisation des turbulences que pour la non-application de la normalisation des turbulences est donnée à l'Article M.5. Le calcul d'incertitude suggéré est également destiné à couvrir les contributions aux incertitudes de l'essai de courbe de puissance dues aux effets des turbulences non liés au moyennage sur 10 min.

M.2 Procédure de normalisation des turbulences

Pour la normalisation des turbulences, il est pris pour hypothèse que l'éolienne suit à chaque instant une courbe de puissance donnée, ici définie comme la courbe de puissance en l'absence de turbulences. La détermination de la courbe de puissance en l'absence de turbulences est décrite à l'Article M.3. La Figure M.1 représente le processus de normalisation des turbulences.



IEC

Anglais	Français
Figure M.6	Figure M.6
Zero-turbulence power curve P_0	Courbe de puissance en l'absence de turbulences, P_0
Measured data (10-minute averages): v and I	Données mesurées (moyennées sur 10 min): v et I
Simulate power time-series data with measured I :	Simuler les données temporelles de puissance avec la valeur I mesurée:
Simulate power time-series data at $I_{\text{reference}}$	Simuler les données temporelles de puissance à $I_{\text{reference}}$
Measured v (10-minute averages) and $I_{\text{reference}}$	Valeur v mesurée (moyennée sur 10 min) et $I_{\text{reference}}$
Measured turbine power	Puissance mesurée de l'éolienne
For each observation	Pour chaque observation
Bin-average $P_{I_{\text{reference}}}$ and v in wind speed bins of 0,5 ms	Moyenne de tranche de $P_{I_{\text{reference}}}$ et de v dans les tranches de vitesse du vent de 0,5 ms
$I_{\text{reference}}$ power curve	Courbe de puissance $I_{\text{reference}}$

Figure M.1 – Processus d'obtention d'une courbe de puissance pour une intensité des turbulences spécifique ($I_{\text{reference}}$)

D'après une courbe de puissance en l'absence de turbulences et une distribution des vitesses du vent sur une période de 10 min, la moyenne sur 10 min de la puissance de sortie de l'éolienne peut être simulée par l'équation suivante:

$$\overline{P_{\text{sim}}(v)} = \int_{v=0}^{\infty} P_{I=0}(v) \cdot f(v) dv \quad (\text{M.1})$$

où

$f(v)$ est la distribution des vitesses du vent sur 10 min;

$P_{I=0}(v)$ est la courbe de puissance en l'absence de turbulences;

$P_{\text{sim}}(v)$ est une moyenne simulée sur 10 min de la puissance de sortie mesurée.

L'Equation (M.1) doit être appliquée aux données de la courbe de puissance (à chaque période de 10 min) pour calculer deux puissances de sortie simulées pour les conditions suivantes:

- 1) la distribution des vitesses du vent est mesurée sur la période de 10 min à la hauteur du moyeu. Une distribution gaussienne $f(v)$ peut être prise pour hypothèse, pleinement déterminée par la vitesse du vent moyenne et par l'écart-type de la vitesse du vent enregistrés pour la période de 10 min. Pour une éolienne avec contrôle de la

puissance active, l'Equation (M.1) doit être évaluée pour la vitesse du vent à la hauteur du moyeu normalisée à la masse volumique de l'air. L'écart-type à appliquer est calculé comme le produit de l'intensité des turbulences mesurée (écart-type de la vitesse du vent divisé par la vitesse du vent moyenne à la hauteur du moyeu) et de la vitesse du vent moyenne normalisée à la masse volumique de l'air (à la hauteur du moyeu).

- 2) une distribution gaussienne des vitesses du vent avec la moyenne sur 10 min de la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu est associée à un écart-type égal au produit de la moyenne sur 10 min de la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu et de l'intensité des turbulences de référence. Pour une éolienne avec contrôle de la puissance active, l'Equation (M.1) doit être évaluée pour la vitesse du vent normalisée à la masse volumique de l'air (à la hauteur du moyeu).

La puissance de sortie mesurée est alors normalisée à l'intensité des turbulences de référence à l'aide de l'équation suivante:

$$\overline{P_{I_{ref}}(v)} = \overline{P(v)} - \overline{P_{sim,I}(v)} + \overline{P_{sim,I_{ref}}(v)} \quad (M.2)$$

où

$\overline{P(v)}$ est la moyenne sur 10 min de la puissance de sortie mesurée;

$\overline{P_{sim,I}(v)}$ est la moyenne simulée sur 10 min de la puissance de sortie mesurée conformément à la condition 1 ci-dessus: Equation (M.1) appliquée pour la distribution des vitesses du vent mesurée (vitesse du vent moyenne et intensité des turbulences mesurées);

$\overline{P_{sim,I_{ref}}(v)}$ est la moyenne simulée sur 10 min de la puissance de sortie mesurée conformément à la condition 2 ci-dessus: Equation (M.1) appliquée pour la vitesse du vent moyenne mesurée et pour l'intensité des turbulences de référence I_{ref} en retenant pour hypothèse une distribution gaussienne des vitesses du vent.

Pour une éolienne à régulation par décrochage, l'Equation (M.2) doit être appliquée avec la puissance de sortie mesurée normalisée à la masse volumique de l'air.

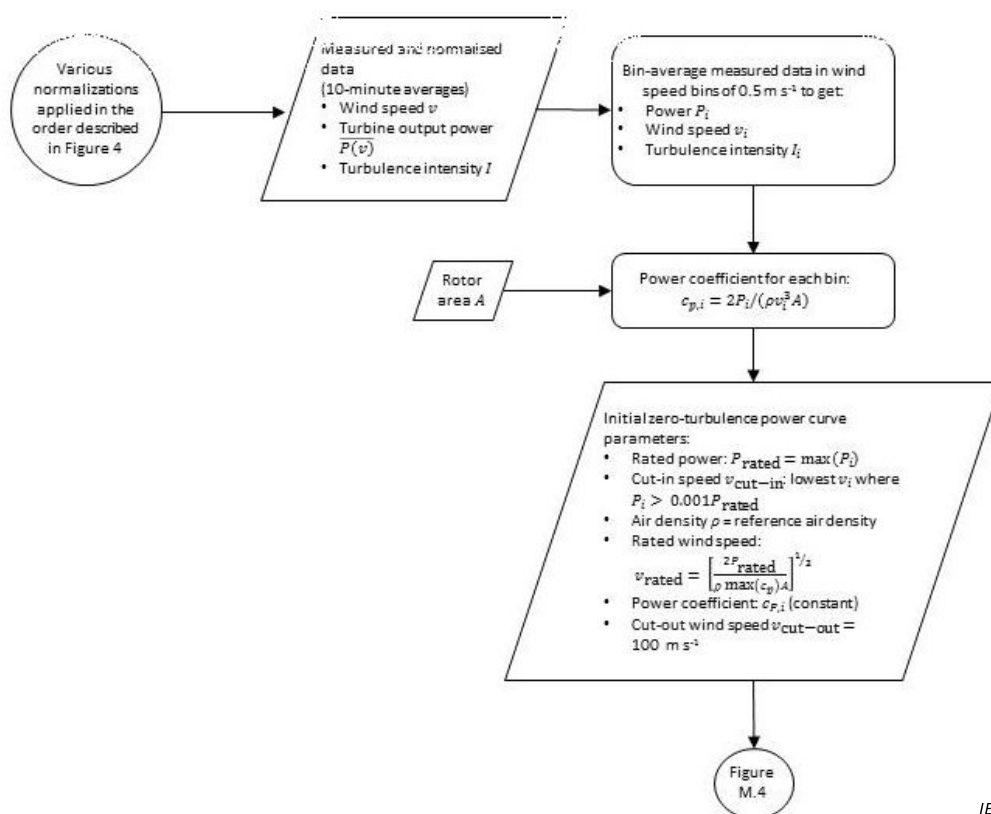
Les données du coefficient de puissance (uniquement destinées à la représentation graphique des mesures) doivent être calculées sur la base de la puissance de sortie normalisée à l'intensité des turbulences de référence. Pour une éolienne à régulation par décrochage, les données du coefficient de puissance doivent être calculées sur la base de la puissance de sortie normalisée à l'intensité des turbulences de référence ainsi que sur la base de la masse volumique de l'air de référence, et non sur la base de la masse volumique de l'air mesurée.

M.3 Détermination de la courbe de puissance en l'absence de turbulences

Une courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences est calculée d'après la courbe de puissance moyennée par tranche normalisée à la masse volumique de l'air. Elle n'est en revanche pas normalisée à l'intensité des turbulences et aucune correction selon le cisaillement du vent n'a été apportée. Pour une première approche, la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences est déterminée de la manière suivante (voir également la Figure M.2 et la Figure M.3):

- a) par hypothèse, la puissance de sortie est nulle en dessous de la vitesse de démarrage. Pour une première approche, la vitesse de démarrage est définie sur la vitesse du vent moyenne de la tranche de vitesse du vent dans laquelle la puissance de sortie mesurée atteint au moins 0,1 % de la puissance assignée;

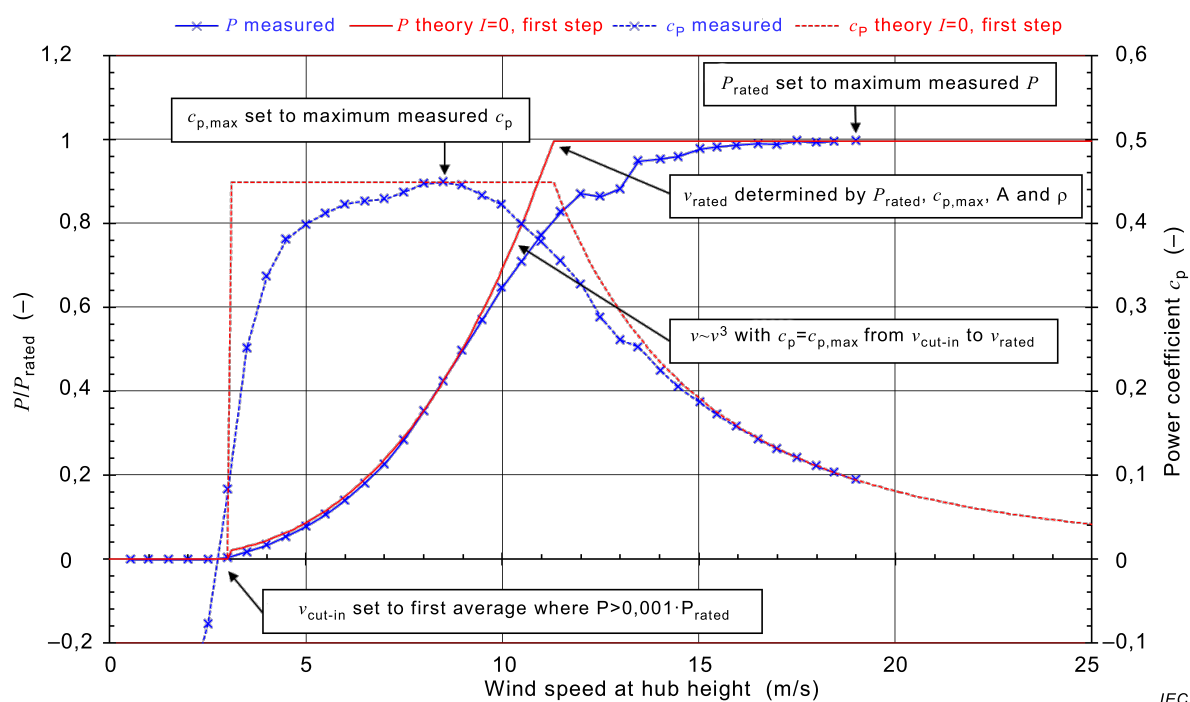
- b) par hypothèse, le coefficient de puissance constante c_p est égal au coefficient de puissance maximale $c_{p,max}$ entre la vitesse de démarrage et la vitesse du vent assignée. Cette hypothèse correspond à une augmentation de la puissance de sortie avec le cube de la vitesse du vent. La courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences doit être calculée à l'aide de cette hypothèse et sur la base de la masse volumique de l'air de référence entre la vitesse de démarrage et la vitesse du vent assignée par incréments dont les valeurs ne dépassent pas 0,1 m/s. Pour une première approche, le coefficient de puissance maximale $c_{p,max}$ doit être établi comme le coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance moyennée par tranche mesurée;
- c) calcul de la vitesse du vent assignée v_{rated} à partir de la puissance assignée P_{rated} , de la surface A balayée par le rotor, du coefficient de puissance maximale $c_{p,max}$ et de la masse volumique de l'air de référence ρ de la manière suivante:
$$v_{rated} = \left(\frac{2 \cdot P_{rated}}{\rho \cdot c_{p,max} \cdot A} \right)^{\frac{1}{3}}.$$
 Pour une première approche, la puissance assignée est établie à la puissance de sortie moyennée par tranche la plus élevée de toutes les tranches de vitesse du vent;
- d) la puissance de sortie est égale à la puissance assignée pour les vitesses du vent supérieures à la vitesse du vent assignée v_{rated} . Pour une première approche, la puissance assignée est établie à la puissance de sortie moyennée par tranche la plus élevée de toutes les tranches de vitesse du vent de la courbe de puissance mesurée. Cette puissance de sortie assignée doit être retenue pour hypothèse dans le cas de vitesses du vent largement supérieures aux vitesses de coupure (p. ex.: 100 m/s) pour la définition de la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences.



IEC

Anglais	Français
Various normalizations applied in the order described in Figure 4	Différentes normalisations appliquées dans l'ordre décrit à la Figure 4
Measured and normalized data (10-minute averages) • Wind speed v • Turbine output power • Turbulence intensity I	Données mesurées et normalisées (moyennées sur 10 min) • Vitesse du vent v • Puissance de sortie de l'éolienne • Intensité des turbulences I
Bin-average measured data in wind speed bins of 0.5 m s^{-1} to get: • Power P_i • Wind speed v_i • Turbulence intensity I_i	Données mesurées de moyenne de tranche dans les tranches de vitesse du vent de 0.5 m s^{-1} pour déterminer: • Puissance P_i • Vitesse du vent v_i • Intensité des turbulences I_i
Rotor area A	Surface du rotor A
Power coefficient for each bin:	Coefficient de puissance pour chaque tranche:
Initial zero-turbulence power curve parameters • Rated power: $P_{\text{rated}} = \max(P_i)$ • Cut-in speed $v_{\text{cut-in}}$: lowest v_i where $P_i > 0.001 P_{\text{rated}}$ • Air density ρ = reference air density • Rated wind speed: • Power coefficient: $C_{p,i}$ (constant) • Cut-out wind speed $v_{\text{cut-out}} = 100 \text{ m s}^{-1}$	Paramètres de la courbe initiale de puissance en l'absence de turbulences • Puissance assignée: $P_{\text{rated}} = \max(P_i)$ • Vitesse de démarrage $v_{\text{cut-in}}$: v_i minimale, où $P_i > 0.001 P_{\text{rated}}$ • Masse volumique de l'air ρ = masse volumique de l'air de référence • Vitesse assignée du vent: • Coefficient de puissance: $C_{p,i}$ (constante) • Vitesse de coupure $v_{\text{cut-out}} = 100 \text{ m s}^{-1}$
Figure M.4	Figure M.4

Figure M.2 – Processus d'obtention des paramètres de la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences depuis les données mesurées



Anglais	Français
P measured	P mesurée
P theory $I=0$, first step	P théorique lorsque $I=0$, première étape
C_p measured	C_p mesuré
C_p theory $I=0$, first step	C_p théorique lorsque $I=0$, première étape
$C_{p,max}$ set to maximum measured C_p	$C_{p,max}$ défini à la valeur C_p maximale mesurée
P_{rated} set to maximum measured P	P_{rated} défini à la valeur P maximale mesurée
V_{rated} determined by P_{rated} , $C_{p,max}$, A and ρ	V_{rated} déterminé par P_{rated} , $C_{p,max}$, A et ρ
$v \sim v^3$ with $c_p = c_{p,max}$ from v_{cut-in} to v_{rated}	$v \sim v^3$ où $c_p = c_{p,max}$ de v_{cut-in} à v_{rated}
V_{cut-in} set to first bin average where $P > 0,001 \cdot P_{rated}$	V_{cut-in} défini à la première moyenne de tranche, où $P > 0,001 \cdot P_{rated}$
P/P_{rated} [-]	P/P_{rated} [-]
Power coefficient C_p [-]	Coefficient de puissance C_p [-]
Wind speed at hub height [m/s]	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu [m/s]

Figure M.3 – Première approche pour la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences

Lors de l'étape suivante, la puissance assignée, la vitesse de démarrage et le coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences doivent être ajustés. En effet, ces trois paramètres dépendent de l'intensité des turbulences et leurs valeurs ont été appliquées à l'étape précédente à la place des valeurs correspondant à une intensité nulle des turbulences. Un moyennage par tranche de l'intensité des turbulences mesurée doit être réalisé comme une fonction de la vitesse du vent mesurée à la hauteur du moyeu. Pour une éolienne avec contrôle de la puissance active, l'intensité des turbulences doit être moyennée par tranche conformément à la vitesse du vent normalisée à la masse volumique de l'air à la hauteur du moyeu.

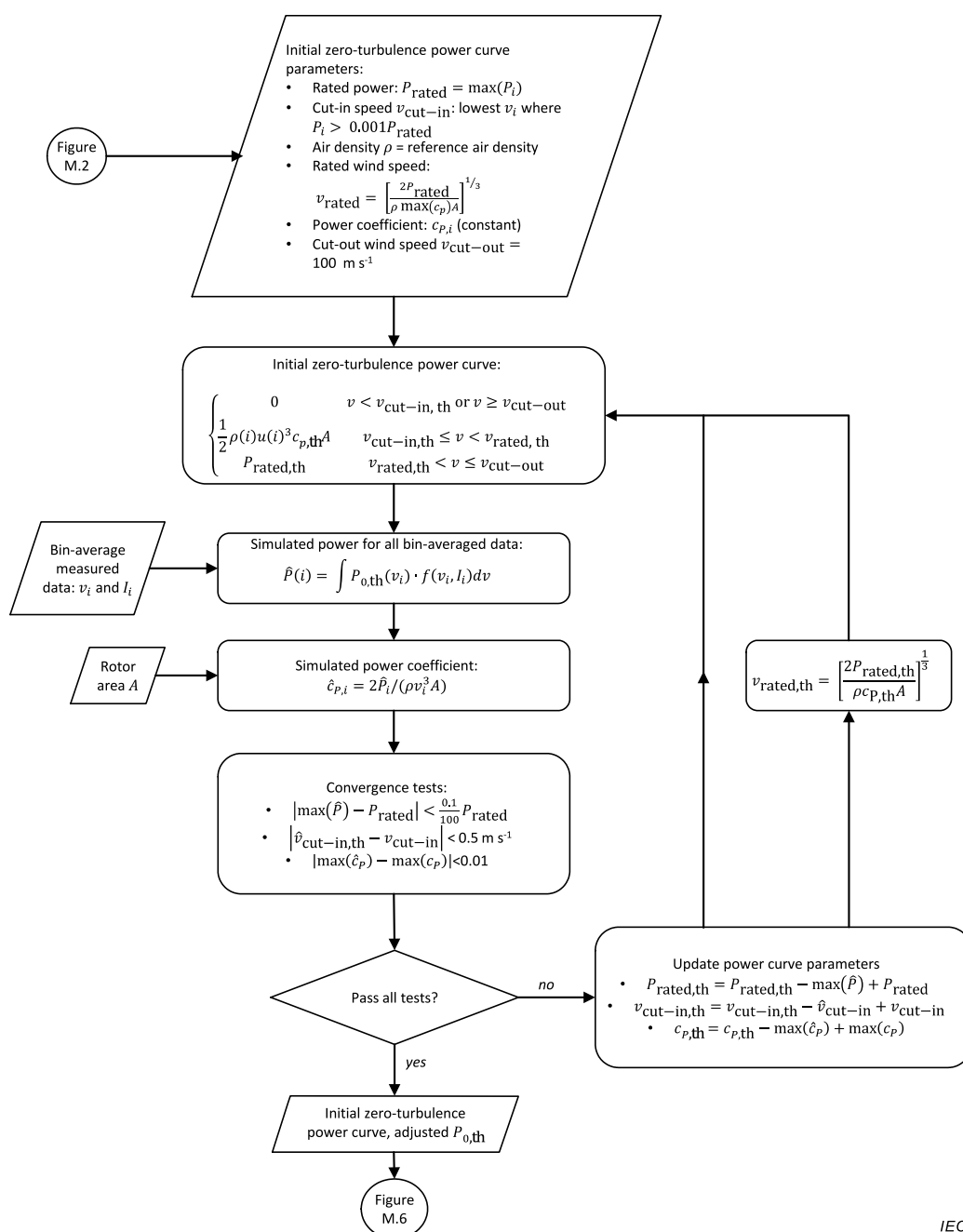
La courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences doit être intégrée à une distribution gaussienne des vitesses du vent conformément à l'Equation (M.1) avec la vitesse du vent moyenne égale à la moyenne de la tranche de la courbe de puissance mesurée et avec l'écart-type calculé comme le produit de la vitesse du vent et de l'intensité des turbulences toutes deux moyennées par tranche. La vitesse du vent normalisée à la masse

volumique de l'air à la hauteur du moyeu doit être appliquée pour une éolienne avec contrôle de la puissance active. Avec cette procédure, la courbe de puissance est simulée pour chaque tranche de vitesse du vent pour l'intensité des turbulences mesurée, alors que la courbe de puissance simulée se réfère exactement aux mêmes tranches de vitesse du vent que la courbe de puissance mesurée. La puissance assignée, la vitesse de démarrage et le coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences doivent alors être ajustés de la manière suivante (voir Figure M.4):

- a) la puissance assignée doit être ajustée de manière à ce que la puissance maximale de la courbe de puissance simulée corresponde à la puissance maximale moyennée par tranche de la courbe de puissance mesurée;
- b) la vitesse de démarrage doit être ajustée de telle manière que la vitesse de démarrage de la courbe de puissance simulée corresponde à la vitesse de démarrage moyennée par tranche de la courbe de puissance mesurée. Pour les deux courbes de puissance, la vitesse de démarrage est définie comme la tranche de vitesse du vent la plus basse dans laquelle la puissance de sortie atteint au moins 0,1 % de la puissance assignée;
- c) le coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance simulée doit être ajusté de manière à correspondre au coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance mesurée.

Les étapes a) à c) susmentionnées doivent être répétées toutes les trois à chaque itération, dans l'ordre donné, jusqu'à obtenir la convergence des trois paramètres dans les conditions minimales indiquées ci-après:

- a) la puissance maximale de la courbe de puissance simulée présente un écart ne dépassant pas 0,1 % de la puissance maximale moyennée par tranche de la courbe de puissance mesurée;
- b) la vitesse de démarrage de la courbe de puissance simulée présente un écart ne dépassant pas 0,5 m/s de la vitesse de démarrage moyennée par tranche de la courbe de puissance mesurée;
- c) le coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance simulée présente un écart ne dépassant pas 0,01 du coefficient de puissance maximale de la courbe de puissance mesurée.



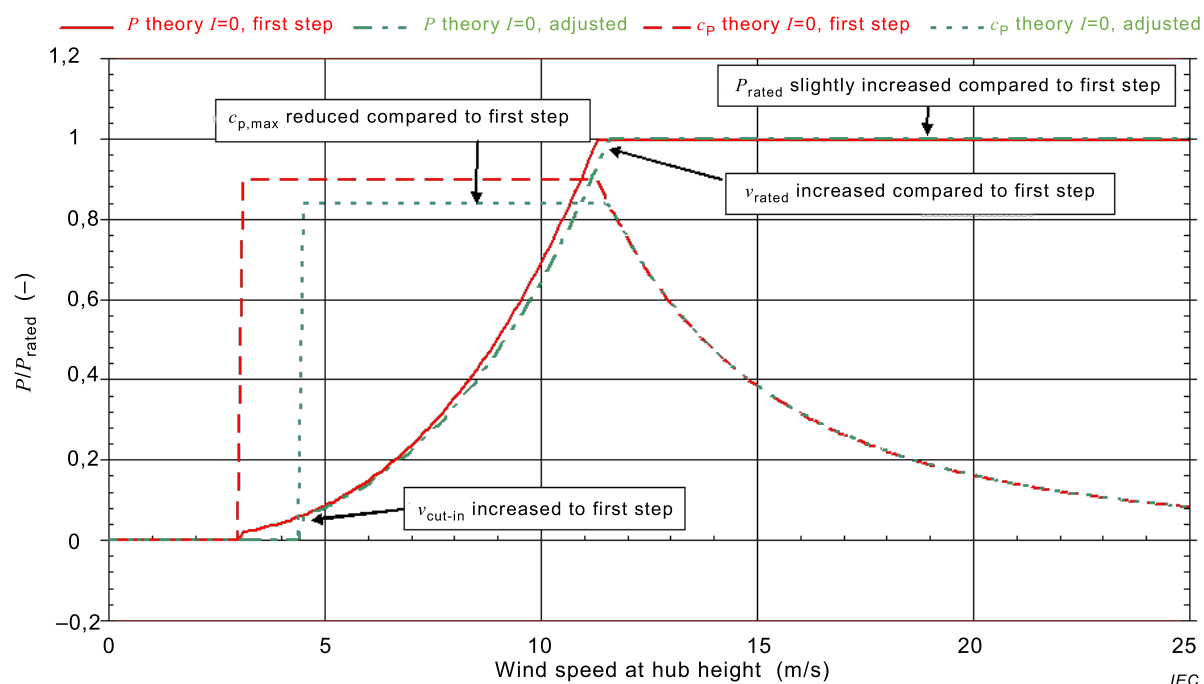
IEC

Anglais	Français
Figure M.2	Figure M.2
Initial zero-turbulence power curve parameters:	Paramètres de la courbe initiale de puissance en l'absence de turbulences:
- Rated power: $P_{\text{rated}} = \max(P_i)$ - Cut-in speed $v_{\text{cut-in}}$: lowest v_i where $P_i > 0,001 P_{\text{rated}}$ - Air density ρ = reference air density - Rated wind speed: - Power coefficient: $c_{p,i}$ (constant) - Cut-out wind speed $v_{\text{cut-out}} = 100 \text{ m s}^{-1}$	- Puissance assignée: $P_{\text{rated}} = \max(P_i)$ - Vitesse de démarrage $v_{\text{cut-in}}$: v_i minimale, où $P_i > 0,001 P_{\text{rated}}$ - Masse volumique de l'air ρ = masse volumique de l'air de référence - Vitesse assignée du vent: - Coefficient de puissance: $c_{p,i}$ (constante) - Vitesse de coupure $v_{\text{cut-out}} = 100 \text{ m s}^{-1}$
Initial zero-turbulence power curve:	Courbe initiale de puissance en l'absence de turbulences:

Anglais	Français
$v < v_{\text{cut-in,th}}$ or $v \geq v_{\text{cut-out}}$	$v < v_{\text{cut-in,th}}$ ou $v \geq v_{\text{cut-out}}$
Bin-average measured data: v_i and I_i	Données mesurées de la moyenne de tranche: v_i et I_i
Simulated power for all bin-averaged data:	Puissance simulée pour toutes les données moyennées par tranche:
Rotor area A	Surface du rotor A
Simulated power coefficient:	Coefficient de puissance simulée:
Convergence tests:	Essais de convergence:
Pass all tests?	Tous les essais ont-ils été réussis?
No	Non
Update power curve parameters	Mettre à jour les paramètres de la courbe de puissance
Yes	Oui
Initial zero-turbulence power curve, adjusted $P_{0,\text{th}}$	Courbe initiale de puissance en l'absence de turbulences, ajustée à $P_{0,\text{th}}$
Figure M.6	Figure M.6

Figure M.4 – Processus d'obtention de la courbe de puissance théorique en l'absence de turbulences depuis les données mesurées

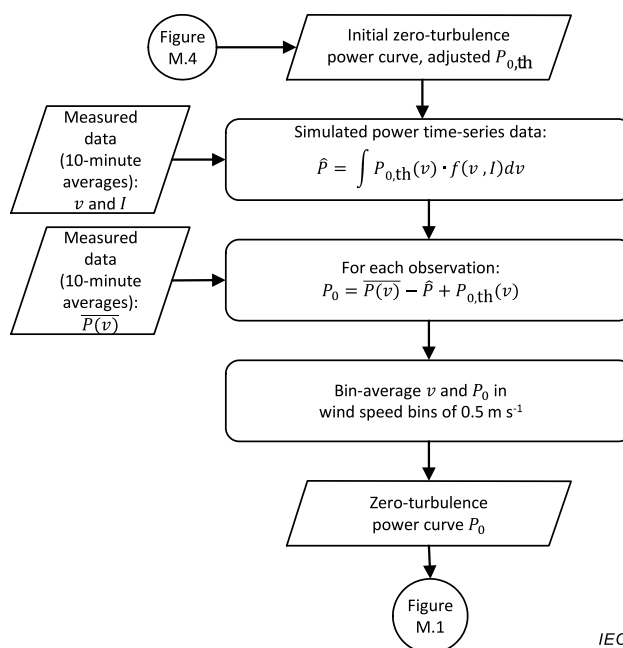
Une convergence suffisante est normalement obtenue après la première ou la seconde itération. La Figure M.5 représente la manière dont, en règle générale, les ajustements modifient la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences à partir de la première étape.



Anglais	Français
P theory $I=0$, first step	P théorique lorsque $I=0$, première étape
P theory $I=0$, adjusted	P théorique lorsque $I=0$, ajustée
c_p theory $I=0$, first step	c_p théorique lorsque $I=0$, première étape
c_p theory $I=0$, adjusted	c_p théorique lorsque $I=0$, ajustée
$c_{p,max}$ reduced compared to first step	$c_{p,max}$ inférieure par rapport à la première étape
P_{rated} slightly increased compared to first step	P_{rated} légèrement supérieure par rapport à la première étape
V_{rated} increased compared to first step	V_{rated} supérieure par rapport à la première étape
V_{cut-in} increased to first step	V_{cut-in} supérieure par rapport à la première étape
P/P_{rated} [-]	P/P_{rated} [-]
Wind speed at hub height [m/s]	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu [m/s]

Figure M.5 – Courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences ajustée (verte) comparée à la première approche (rouge)

La courbe de puissance en l'absence de turbulences doit alors être déterminée en appliquant le processus de normalisation des données décrit à l'Article M.2 avec la courbe de puissance en l'absence de turbulences établie à la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences dans l'Equation (M.1) et, par hypothèse, une intensité des turbulences nulle (vitesse du vent constante pendant la période de 10 min). La courbe de puissance finale en l'absence de turbulences est obtenue à l'aide d'un moyennage de tranche des données brutes ainsi normalisées de la courbe de puissance (voir Figure M.6). La courbe de puissance moyennée par tranche doit être étendue avec la puissance de sortie de la tranche de vitesse du vent la plus élevée largement supérieure aux vitesses de coupure (p. ex.: 100 m/s) lors de l'application des Equations (M.1) et (M.2) pour les normalisations des turbulences.

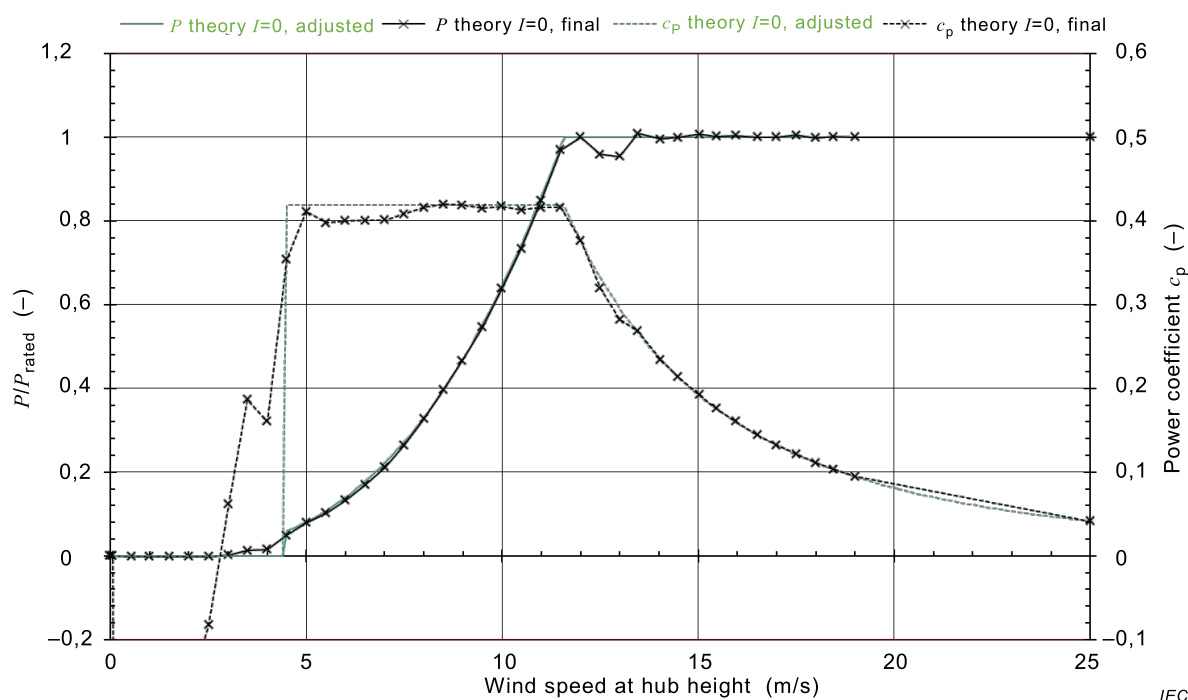


IEC

Anglais	Français
Figure M.4	Figure M.4
Initial zero-turbulence power curve, adjusted $P_{0,th}$	Courbe initiale de puissance en l'absence de turbulences, ajustée à $P_{0,th}$
Measured data (10-minute-averages): v and I	Données mesurées (moyennées sur 10 min): v et I
Simulated power time-series data:	Données temporelles de puissance simulée:
Measured data (10-minute-averages): $\overline{P(v)}$	Données mesurées (moyennées sur 10 min): $\overline{P(v)}$
For each observation:	Pour chaque observation:
Bin-average v and P_0 in wind speed bins of $0,5 \text{ m s}^{-1}$	Moyenne de tranche de v et de P_0 dans les tranches de vitesse du vent de $0,5 \text{ m s}^{-1}$
Zero-turbulence power curve P_0	Courbe de puissance en l'absence de turbulences, P_0
Figure M.1	Figure M.1

Figure M.6 – Processus d'obtention de la courbe de puissance finale en l'absence de turbulences depuis les données mesurées

La Figure M.7 donne une comparaison type de la courbe de puissance finale en l'absence de turbulences et de la courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences.



Anglais	Français
P theory $I=0$, adjusted	P théorique lorsque $I=0$, ajustée
P theory $I=0$, final	P théorique lorsque $I=0$, finale
c_p theory $I=0$, adjusted	c_p théorique lorsque $I=0$, ajustée
c_p theory $I=0$, final	c_p théorique lorsque $I=0$, finale
P/P_{rated} [-]	P/P_{rated} [-]
Power coefficient c_p [-]	Coefficient de puissance c_p [-]
Wind speed at hub height [m/s]	Vitesse du vent à la hauteur du moyeu [m/s]

Figure M.7 – Courbe de puissance initiale en l'absence de turbulences ajustée (verte) comparée à la courbe de puissance finale en l'absence de turbulences (noire)

M.4 Ordre de la correction du cisaillement du vent (normalisation) et de la normalisation des turbulences

En règle générale, l'ordre d'application de la correction (ou de la normalisation) du cisaillement du vent ou de la déviation de la trajectoire du vent et de la normalisation des turbulences n'a pas d'influence majeure sur la courbe de puissance finale. Il est plus pratique d'appliquer uniquement la normalisation des turbulences sur la base de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu (voir les Articles M.2 et M.3), mais elle pourrait l'être également sur la base de la vitesse du vent après correction (ou normalisation) du cisaillement du vent ou de la déviation de la trajectoire du vent lorsque les mesures de la vitesse du vent sur la totalité de la hauteur du rotor permettent d'appliquer la correction du cisaillement du vent. Enfin, la puissance finale doit être calculée à l'aide d'un moyennage de tranche de la puissance de sortie normalisée des turbulences par rapport à la vitesse du vent après correction (ou normalisation) du cisaillement du vent ou de la déviation de la trajectoire du vent. Pour une éolienne avec contrôle de la puissance active, la vitesse du vent après correction (ou normalisation) du cisaillement du vent doit être normalisée à la masse volumique de l'air avant de procéder au moyennage de tranche. Pour une éolienne à régulation par décrochage, une correction a déjà été apportée pour la masse volumique de l'air à la puissance de sortie normalisée des turbulences selon l'Article M.2.

M.5 Incertitude de la normalisation des turbulences ou des courbes de puissance dues aux effets des turbulences

La normalisation des turbulences décrite à l'Article M.2 et à l'Article M.3 a été conçue de manière à gérer les effets du moyennage des données sur une période de 10 min sur la courbe de puissance évaluée. L'intensité des turbulences a d'autres effets sur les courbes de puissance de l'éolienne; ces effets pourraient, par exemple, être dus à l'impact direct de l'intensité des turbulences sur l'aérodynamique ou au caractère tridimensionnel des turbulences. En fin de compte, la normalisation de l'intensité des turbulences constitue une approche fortement simplifiée de la caractérisation des variations de la vitesse du vent à court terme. Il persiste donc une incertitude de la courbe de puissance évaluée due aux effets des turbulences éventuelles, même si la procédure de normalisation des turbulences est appliquée. La normalisation des turbulences élimine souvent environ la moitié des effets observés de l'intensité des turbulences sur les courbes de puissance mesurées de l'éolienne. Il convient donc d'exécuter les étapes ci-dessous afin de calculer l'incertitude de la normalisation des turbulences:

- a) la courbe de puissance finale moyennée par tranche doit être évaluée en fonction de la puissance de sortie normalisée des turbulences, ainsi que de la puissance de sortie non normalisée des turbulences;
- b) il doit être pris pour hypothèse que l'écart entre ces deux courbes de puissance correspond à l'incertitude maximale de la courbe de puissance normalisée des turbulences par tranche de vitesse du vent, issue de la normalisation des turbulences. L'incertitude-type issue de la normalisation des turbulences par tranche de vitesse du vent doit être calculée comme étant l'écart entre les courbes de puissance divisé par $\sqrt{3}$. L'incertitude-type doit être combinée avec les autres incertitudes de la mesure de performance de puissance pour déterminer l'incertitude-type totale, conformément à l'Annexe D.

L'incertitude des effets des turbulences sur la mesure doit également être prise en compte si aucune normalisation des turbulences n'est réalisée, l'incertitude étant plus élevée, car la courbe de puissance est uniquement valide pour les conditions de turbulences présentes au cours de l'essai de performance de puissance et non pour une intensité des turbulences de référence présentant un écart avec les conditions de l'essai. Par conséquent, si aucune normalisation des turbulences n'est appliquée, l'estimation suivante de l'incertitude due aux effets des turbulences est recommandée:

- 1) deux courbes de puissance normalisées des turbulences doivent être évaluées conformément à l'Article M.2 et l'Article M.3 uniquement pour la détermination de l'incertitude. Dans un premier temps, la courbe de puissance doit être normalisée à une intensité des turbulences extrêmement faible puis, dans un second temps, doit être normalisée à une intensité des turbulences extrêmement élevée. Si les utilisateurs n'ont pas prédéfini de limites d'intensité des turbulences, les valeurs d'intensité des turbulences 0,05 et 0,15 doivent être considérées comme les intensités des turbulences extrêmes pour les normalisations des deux courbes de puissance;
- 2) par hypothèse, l'écart entre les deux courbes de puissance normalisées doit correspondre à la moitié de l'incertitude maximale due aux effets des turbulences. L'incertitude-type issue de la normalisation des turbulences par tranche de vitesse du vent doit être calculée comme l'écart entre les deux courbes de puissance normalisées multiplié par le facteur $2/\sqrt{3}$. L'incertitude-type doit être composée avec les autres incertitudes pour la détermination de l'incertitude totale de la courbe de puissance, conformément à l'Annexe D;

- 3) si la courbe de puissance mesurée doit être comparée à une courbe de puissance qui se réfère à une intensité des turbulences donnée (pouvant dépendre de la vitesse du vent, par exemple une courbe de puissance garantie) et si aucune normalisation de la courbe de puissance n'est réalisée, les deux intensités des turbulences extrêmes appliquées à l'étape 1) doivent être remplacées par l'intensité des turbulences mesurée moyennée par tranche ainsi que par l'intensité des turbulences de référence de la courbe de puissance à comparer pour le calcul d'incertitude.

Annexe N (informative)

Procédure d'étalonnage de la soufflerie pour les capteurs de direction du vent

N.1 Généralités

Cette procédure décrit la méthode d'étalonnage des dispositifs de détection de la direction du vent, notamment des girouettes et des anémomètres à ultrasons utilisés comme dispositifs de détection de la direction du vent.

N.2 Exigences générales

Les exigences générales pour l'étalonnage des capteurs de direction du vent sont résumées de la manière suivante:

- a) l'étalonnage du capteur de direction du vent doit être réalisé dans une soufflerie fonctionnelle qui est adaptée à l'étalonnage des capteurs de direction du vent;
- b) l'installation d'étalonnage doit être accréditée conformément à l'ISO/IEC 17025, qui est la norme pour les laboratoires d'étalonnages et d'essais;
- c) tous les transducteurs et le matériel de mesure adaptés à l'étalonnage des capteurs de direction du vent doivent présenter des étalonnages traçables. Les certificats et rapports d'étalonnage doivent contenir toutes les informations pertinentes relatives à la traçabilité. Toutes les normes de référence utilisées pendant l'étalonnage des capteurs de direction du vent doivent être indiquées dans le rapport d'essai de la campagne d'étalonnage;
- d) avant chaque campagne d'étalonnage (lorsqu'un lot de capteurs de direction du vent est en cours d'étalonnage), l'intégrité du montage expérimental doit être vérifiée par un étalonnage comparatif du "capteur de direction du vent de contrôle de qualité" de l'installation d'étalonnage;
- e) des mesures de la qualité de l'écoulement doivent être effectuées conformément à l'Article N.3;
- f) la répétabilité de l'étalonnage doit être vérifiée conformément à l'Article N.3;
- g) l'étalonnage du capteur de direction du vent doit s'appuyer sur une évaluation exhaustive de l'incertitude d'étalonnage, réalisée conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (GUM 1995).

N.3 Exigences pour la soufflerie

La soufflerie doit satisfaire aux exigences données à l'Article F.2.

La présence du capteur de direction du vent ne doit pas affecter de manière considérable la direction de l'écoulement (champ) dans la soufflerie. Pendant son étalonnage, le capteur de direction du vent peut entraîner une déviation de l'écoulement qui ne se produit pas lorsque ledit capteur fonctionne à l'air libre. Pour maintenir ces effets à un niveau acceptable, le rapport d'obstruction ne doit pas dépasser 0 pour une section d'essai ouverte et 0,05 pour une section d'essai fermée. Il est défini comme le rapport de la surface frontale du capteur de direction du vent dont l'ailette est alignée avec l'écoulement et son système de montage à la surface totale de la section d'essai.

Une attention particulière doit en outre être portée afin de vérifier que la direction horizontale de l'écoulement de la soufflerie est parallèle à l'axe central de la section d'essai. Avant de procéder à l'étalonnage du capteur de direction du vent, l'uniformité du champ d'écoulement (exigée par l'Annexe F) et la direction de l'écoulement doivent être évaluées. La direction de l'écoulement doit être étudiée par rapport à l'axe central de la section d'essai à l'emplacement

représentatif du capteur de direction du vent à l'aide de dispositifs de mesure de l'écoulement sensibles à la direction (dispositif de mesure de l'orientation conique à deux trous). La direction horizontale de l'écoulement mesurée doit être parallèle à l'axe central de la section d'essai avec une marge de $0,2^\circ$. L'écart doit être pris en compte dans l'évaluation des données.

L'installation doit être soumise à un examen approfondi de la répétabilité des étalonnages du capteur de direction du vent. L'installation doit indiquer au moins un capteur de direction du vent de référence destiné à être utilisé pour ces essais. Le ou les capteurs de direction du vent de référence doivent uniquement être utilisés pour vérifier la performance de cette installation d'étalonnage du capteur de direction du vent ainsi que d'autres installations de fonction similaire. L'examen de répétabilité doit inclure un minimum de 10 étalonnages du capteur de direction du vent de contrôle de qualité. L'essai de répétabilité ne doit pas être réalisé successivement. Cet essai est plus représentatif si les étalonnages sont réalisés sur un intervalle de temps plus espacé. Cela fournira une plus large plage de conditions atmosphériques au cours des essais. Il convient que la différence maximale entre les étalonnages du même capteur de référence soit inférieure à $0,5^\circ$ à une vitesse du vent de 8 m/s pendant toute la durée de la mesure du capteur de direction du vent à l'exclusion du nord (girouettes), où des conditions non définies existent habituellement. Ce processus doit être répété après toute modification ou tout réétalonnage de l'installation. Il doit être prouvé que les résultats de l'installation sont comparables à ceux des autres installations d'étalonnage d'anémomètres en réalisant des essais d'aptitude, conformément à l'ISO 17043.

Il convient que l'étalonnage moyen du capteur de direction du vent de référence de l'installation (déterminé par les essais de répétabilité décrits ci-dessus) soit en adéquation avec le résultat moyen d'autres installations d'étalonnage, avec un écart de la direction de l'écoulement équivalente indiquée de moins de 1° pour la totalité de la plage de mesure, à l'exception du nord, à une vitesse du vent de 8 m/s.

N.4 Exigences de configuration de l'instrumentation et de l'étalonnage

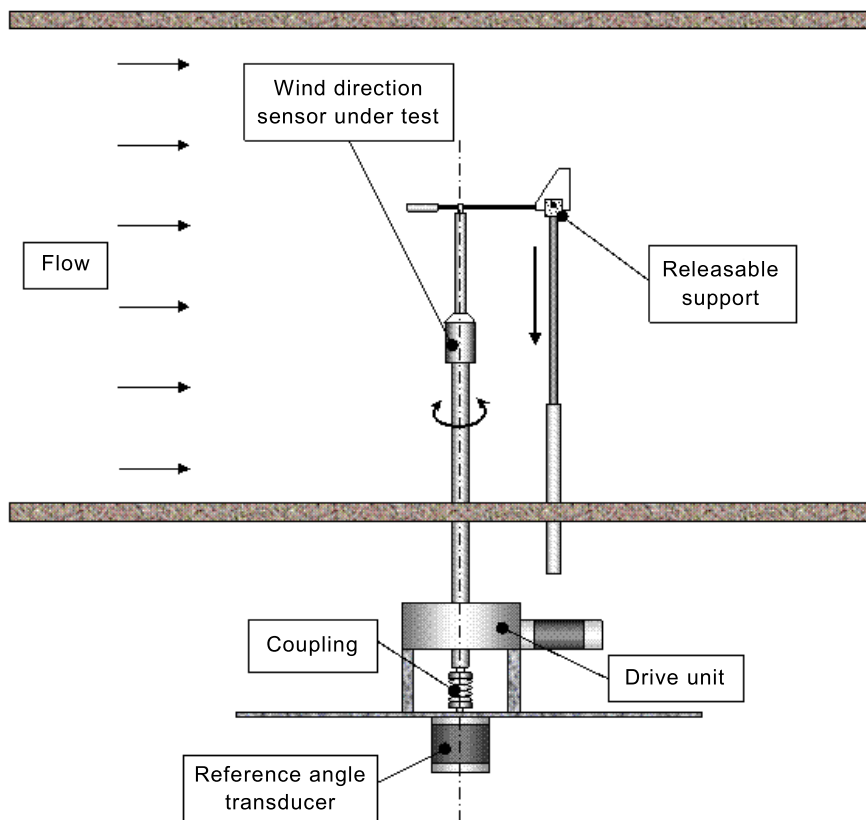
Le matériel dédié au conditionnement du signal externe, par exemple les amplificateurs d'instruments, etc., doit être étalonné séparément du capteur de direction du vent; l'étalonnage du capteur de direction du vent peut alors être déduit et consigné indépendamment du matériel de conditionnement du signal. La résolution du système d'acquisition de données doit être au minimum de 12 bits. Une attention particulière doit également être prêtée en cas d'instrument de mesure de la tension analogique visant à garantir que le signal est correctement mis en tampon afin d'empêcher son atténuation par un matériel d'enregistrement de faible impédance. De tels effets sont aisément négligés dans le sens où des signaux "crédibles" sont toujours enregistrés. Le système de mesure de l'angle de référence doit être de type direct (codage d'angle direct, comptage des incréments, mesure de la grandeur proportionnelle, par exemple la méthode magnétique, par induction ou potentiométrique). L'arbre du système de mesure de l'angle de référence doit être raccordé à l'arbre du mécanisme de rotation du capteur de direction du vent à l'aide d'un couplage sans jeu entre-dents. Le couplage doit être résistant aux torsions et flexible (élastique en cas de flexion) afin d'éliminer le plus possible les grandeurs qui influencent l'assemblage (tolérances de concentricité et angles des deux axes de rotation). Les axes de rotation doivent être orientés de manière concentrique et coaxiale. Le logement du système de mesure de l'angle de référence doit être fixé de manière sécurisée sans présenter de jeu entre-dents. Le capteur de mesure de l'angle de référence doit être positionné dans la soufflerie de manière aussi précise que possible, et il peut ne pas perturber le capteur de direction du vent à l'essai. L'écart maximal admis est $0,1^\circ$. La Figure N.1 illustre un exemple de montage d'étalonnage dans une soufflerie.

Au cours de l'étalonnage, le capteur de direction du vent doit être monté au sommet d'un tube afin de réduire le plus possible la distorsion de l'écoulement. Ce tube doit présenter les mêmes dimensions que celui sur lequel le capteur de direction du vent sera monté pour son fonctionnement dans l'atmosphère libre. Il est important de garantir que le champ d'écoulement autour du capteur de direction du vent n'est pas influencé par la présence d'un

matériel de mesure de la vitesse du vent de référence. La présence du capteur de direction du vent ne doit donc pas affecter la direction de l'écoulement de façon significative.

Le capteur de direction du vent doit être monté au niveau de la section d'essai, perpendiculaire au champ d'écoulement de la soufflerie, de manière aussi précise que possible. L'écart maximal admis est $0,2^\circ$. L'ailette doit également être alignée avec l'axe de référence/indicateur du nord et maintenue dans cette position par un support réglable jusqu'au lancement du processus d'étalonnage. Un alignement précis du capteur de direction du vent et de son ailette peut être obtenu grâce à un dispositif approprié, par exemple un gabarit mécanique ou l'utilisation d'un instrument optique (niveau laser 2D). Le signal de sortie du capteur de direction du vent doit être examiné au cours de l'étalonnage pour garantir qu'il n'est pas soumis à des interférences ou nuisances sonores. La détermination de la vitesse d'écoulement dans la soufflerie doit être conforme à l'Annexe F.

Une attention particulière doit être prêtée lors de l'alignement du capteur de direction du vent avec l'axe de référence (axe central) de la soufflerie. L'indicateur de référence mécanique (en règle générale, indicateur du nord) du capteur de direction du vent doit être aligné de manière adéquate avec l'axe de référence de la soufflerie. Il n'est pas acceptable de réaliser l'alignement angulaire du capteur de direction du vent en utilisant uniquement son signal de sortie électrique. Cela provoquerait un écart angulaire entre l'indication de référence externe et la valeur indiquée par le transducteur angulaire interne du capteur de direction du vent. Cet écart serait ensuite difficile à repérer puisque l'alignement de la girouette avec le mât météorologique est généralement effectué à l'aide de l'indicateur du nord. L'alignement angulaire convenable pour l'étalonnage doit être assuré au moyen d'une méthode adéquate permettant de mesurer l'indicateur de référence.



IEC

Anglais	Français
Wind direction sensor under test	Capteur de direction du vent à l'essai
Flow	Ecoulement

Anglais	Français
Releasable support	Support amovible
Coupling	Couplage
Drive unit	Unité d'entraînement
Reference angle transducer	Transducteur d'angle de référence

Figure N.1 – Exemple de montage d'étalonnage d'un capteur de direction du vent dans une soufflerie

N.5 Procédure d'étalonnage

En règle générale, le capteur de direction du vent doit être placé dans le sens de la direction à l'aide d'un mécanisme de rotation adéquat (table de rotation) tandis que la direction et la vitesse de l'écoulement restent inchangées. Le signal de sortie du capteur de direction du vent est ensuite évalué par rapport au système de mesure de l'angle de référence installé au niveau du mécanisme de rotation.

La procédure d'étalonnage des capteurs de direction du vent est la suivante:

Le capteur de direction du vent effectue une rotation à une vitesse d'orientation constante ou de manière progressive. L'angle d'orientation indiqué (valeur mesurée par le capteur de direction du vent) est enregistré au même moment que l'angle d'orientation de référence (valeur mesurée par le mécanisme de rotation). La vitesse de rotation choisie constitue un compromis entre la précision de mesure adéquate et le temps de mesure réel. La vitesse recommandée est 0,5 °/s. Pour une procédure progressive, il est important d'avoir une incrémentation bien adaptée de moins de 3° afin de ne pas manquer de données de direction erronées. La fréquence d'échantillonnage doit être suffisamment élevée (généralement 1 Hz ou plus rapide) pour obtenir une polarisation d'échantillonnage comprise dans les limites acceptables. La température du capteur de direction du vent ne doit pas varier de manière significative au cours de son étalonnage afin de réduire le plus possible l'incertitude supplémentaire due aux effets engendrés par la température sur la direction indiquée. Avant de procéder à l'étalonnage, une exécution sur une période supérieure à 1 min doit être incluse pour réduire le plus possible l'écart de température entre le capteur de direction du vent et l'écoulement dans la soufflerie.

Le processus d'étalonnage doit être composé au minimum de deux balayages d'orientation complets (y compris le saut au nord) pour chacune des procédures susmentionnées. Les balayages doivent s'effectuer dans les directions opposées afin de prendre en compte les éventuels effets d'hystérésis. Un chevauchement angulaire des points de données d'au moins 10° doit exister au début et à la fin de chaque balayage. Une séquence possible peut couvrir un balayage dans le sens horaire à partir de –10° à 370° et une exécution dans le sens antihoraire à partir de 370° à –10° pour le balayage suivant.

L'étalonnage doit être réalisé à une vitesse du vent constante de $(8 \pm 10 \%)$ m/s. Il convient que la vitesse du vent moyenne ne varie pas pendant toute la durée de l'étalonnage du capteur de direction du vent.

N.6 Analyse des données

Seul le vecteur de vent horizontal doit être étudié lors de l'évaluation des données du capteur de direction du vent. Pour les girouettes comme pour les anémomètres à ultrasons, l'évaluation du signal de direction du vent doit être réalisée à l'aide de la méthode du moyennage vectoriel décrite dans l'ISO 16622 [4] et en 7.3.

Toutes les données pertinentes doivent être évaluées comme des données moyennées par tranche. Dans le présent document, les données du capteur d'orientation de référence sont utilisées comme fondement pour définir l'intervalle entre les tranches pour la base de

données restante. La largeur de tranche doit présenter une résolution minimale de 10°, centrée à 5°, 15°, etc. du dispositif d'orientation. La largeur de tranche doit être réduite afin d'évaluer de manière appropriée le comportement de types de capteurs donnés (anémomètres à ultrasons) ou de mieux représenter les caractéristiques des capteurs (non-linéarité excessive).

N.7 Analyse d'incertitude

Il est important d'identifier l'incertitude de mesure de la direction de l'écoulement horizontal en conjonction avec le capteur de direction du vent.

Une analyse d'incertitude doit être réalisée conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3 pour l'expression de l'incertitude de mesure intégrant tant les incertitudes de catégorie A que celles de catégorie B. L'amplitude de l'incertitude nette doit être évaluée d'un point de vue statistique et doit prendre en compte les éléments suivants:

- a) incertitude de mesure du système de mesure de l'angle de référence (transducteur d'angle de référence, couplage, montage, transducteurs électriques, conversion numérique, etc.);
- b) incertitude de la direction de l'écoulement mesurée par le capteur de direction du vent, intégrant une évaluation de la possibilité que le capteur de direction du vent entraîne une déviation de l'écoulement;
- c) incertitude de montage du capteur de direction du vent (alignement de l'indicateur du nord et de l'ailette avec l'axe central de la soufflerie);
- d) incertitude de catégorie A due à une dispersion à court terme (le signal du capteur de direction du vent peut varier au fil du temps en raison des conditions d'écoulement instables);
- e) incertitude de catégorie A due à une dispersion à long terme (dispersion/dérive des résultats d'étalonnage du capteur de direction du vent de référence au fil du temps au cours de plusieurs étalonnages);
- f) incertitude de mesure du signal électrique du capteur de direction du vent (transducteur électrique, conversion numérique, etc.).

N.8 Format de rapport

La documentation appropriée doit fournir les informations relatives à la procédure suivie, l'installation utilisée pour l'étalonnage du capteur de direction du vent (rapport d'essai de la campagne d'étalonnage) et l'étalonnage du capteur de direction du vent individuel (rapport d'étalonnage du capteur de direction du vent). Le rapport d'essai du montage de l'installation d'étalonnage doit inclure au minimum les informations suivantes:

- a) description de la soufflerie (y compris section d'essai, chambre de dépôt, redresseurs d'écoulement, disposition des ventilateurs);
- b) croquis de la soufflerie présentant les emplacements exacts du capteur de direction du vent et des tubes de Pitot dans la section d'essai;
- c) mesures de la qualité de l'écoulement;
- d) mesures des turbulences;
- e) certificats d'instrumentation;
- f) procédure de mesure;
- g) procédure d'évaluation des données;
- h) documentation sur la répétabilité de l'étalonnage du capteur de direction du vent;
- i) analyse d'incertitude;
- j) écarts par rapport à ces exigences.

Le rapport d'étalonnage d'un capteur de direction du vent doit, au minimum, inclure les informations suivantes:

- a) marque, type et numéro de série du capteur de direction du vent à l'essai et numéro de série de l'ailette si elle peut être séparée du capteur;
- b) diamètre du tube du système de montage;
- c) marque, type et numéro de série des convertisseurs externes, le cas échéant (convertisseurs fréquence-tension);
- d) nom et adresse du client;
- e) signatures des personnes qui ont réalisé l'étalonnage, vérifié les résultats et approuvé leur publication;
- f) nom de la soufflerie;
- g) conditions environnementales au cours de l'étalonnage (température de l'air, pression atmosphérique et humidité);
- h) paramètres de régression (décalage et pente), dans une présentation sous forme de tableaux et graphiques de tous les points d'étalonnage;
- i) informations sur la largeur de la zone morte indiquant le nord;
- j) Le tableau doit contenir les informations suivantes:
 - 1) nombre de tranches;
 - 2) direction (écoulement) de référence moyenne par tranche;
 - 3) signal de direction indiqué moyen du capteur de direction du vent par tranche;
 - 4) incertitude par tranche;
 - 5) vitesse d'écoulement dans la soufflerie par tranche.
- k) La représentation graphique doit inclure les éléments suivants:
 - 1) signal du capteur de direction du vent indiqué comme une fonction de l'angle d'orientation de référence par tranche;
 - 2) diagramme de dispersion du signal du capteur de direction du vent en fonction de l'angle d'orientation de référence si le balayage est utilisé;
 - 3) diagramme de dispersion des résidus du signal du capteur en fonction de l'angle d'orientation de référence;
 - 4) résidus par tranche (écart entre le signal du capteur de direction du vent indiqué et le résultat de la fonction d'étalonnage du capteur de direction du vent);
 - 5) incertitude associée à chaque point de mesure.
- l) référence au rapport de campagne d'étalonnage correspondant et date de l'étalonnage;
- m) photo du capteur de direction du vent et du montage dans la soufflerie.
- n) vitesse angulaire, largeur des tranches de données et nombre de points de données obtenus par tranche.

N.9 Exemple de calcul d'incertitude

N.9.1 Généralités

La détermination de l'incertitude de mesure s'appuie sur l'hypothèse que les trois sources principales ci-après contribuent à l'incertitude totale:

- a) détermination de la direction de l'écoulement dans la soufflerie (catégorie B);
- b) incertitude due au capteur de direction du vent à étalonner (girouette, anémomètre à ultrasons) (catégorie B);
- c) répétabilité (catégorie A).

Seules les incertitudes de catégorie B sont prises en compte ci-après. Pour déterminer l'incertitude totale, la composante de catégorie A doit également être incluse.

N.9.2 Incertitudes de mesure pour la détermination de la direction de l'écoulement dans la soufflerie

N.9.2.1 Généralités

Pour évaluer l'incertitude de mesure pour la détermination de la direction de l'écoulement, les incertitudes individuelles suivantes doivent être étudiées:

N.9.2.2 Contribution d'incertitude pour la détermination de l'axe central géométrique α_{CL} (axe central de la soufflerie)

En prenant pour hypothèse que l'axe central est défini par de simples méthodes géométriques et que les axes présentent une marge de précision de 2 mm pour une section d'essai de 1,00 m par 2,00 m, l'incertitude de l'axe central géométrique est égale à 0,1°. En prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire, la contribution à l'incertitude-type totale est 0,06°.

N.9.2.3 Contribution d'incertitudes pour la détermination de la direction de l'écoulement α_{dir}

L'étalonnage de la direction de l'écoulement est réalisé à l'aide d'une sonde de calage. Une soufflerie correctement conçue ne présente en pratique aucun écart de direction de l'écoulement par rapport à son axe central géométrique. La contribution d'incertitude est estimée à 0,1°. En prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire, la contribution à l'incertitude-type totale est 0,06°.

N.9.2.4 Contribution d'incertitudes pour l'étalonnage du capteur d'orientation de référence α_{sensor}

L'angle de référence est défini à l'aide d'un capteur d'orientation électronique. La contribution d'incertitude pour l'étalonnage de ce capteur est 0,35°, par hypothèse. En prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire, la contribution à l'incertitude-type totale est 0,2°.

N.9.2.5 Contribution en alignant l'axe central avec l'indicateur du nord par le capteur de direction du vent α_{set}

Le capteur (indicateur du nord, ailette, axe central de la soufflerie) peut être aligné à l'aide d'un laser. En prenant pour hypothèse que le faisceau laser présente un écart maximal de 1 mm par rapport à l'axe central, la contribution d'incertitude est inférieure à 0,1°. Par hypothèse, la contribution d'incertitude totale est 0,1°. En prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire, la contribution à l'incertitude-type totale est 0,06°.

N.9.2.6 Contribution due à l'influence de l'angle entre les axes de rotation $\alpha_{incl.1}$

Lors du montage de l'unité de référence sur le dispositif d'entraînement rotatif, des erreurs peuvent se produire dans l'angle entre les axes de rotation du dispositif d'entraînement rotatif et l'unité de référence (inclinaison de l'objet étalonné par rapport à l'inclinaison du dispositif d'étalonnage). Les axes de rotation ne s'alignent pas, mais un couplage entre les arbres de l'objet de référence et de l'objet étalonné compense, dans une certaine mesure, l'effet engendré par la position des plans de mesure d'angle. L'erreur d'angle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\delta\alpha_{incl.1} = 0,125 \cdot (2 \cdot p / r)^2 \cdot \sin\alpha \quad (N.1)$$

où, conformément à VDI/VDE 2648, référence [5]:

α est l'angle à mesurer (valeur d'étalonnage);

p est l'écart de battement circulaire;
 r est le rayon effectif de la mesure de l'angle.

En prenant pour hypothèse un écart des niveaux de 1 mm et un rayon de 50 mm pour le capteur d'orientation, le cas extrême de $\alpha = 90^\circ$ mène à une incertitude de $0,01^\circ$.

N.9.2.7 Contribution à l'incertitude par l'excentricité potentielle entre le capteur de direction du vent et l'unité de référence α_{Exz}

En procédant au montage du capteur de direction du vent sur le dispositif d'entraînement rotatif de l'unité de référence, des excentricités peuvent se produire en raison du désalignement parallèle entre les axes de rotation respectifs. Les axes de rotation ne s'alignent pas. L'erreur d'angle qui peut se produire en raison du désalignement parallèle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\delta\alpha_{\text{Exz}} = 2 \cdot (e / r) \cdot \sin(\alpha / 2) \quad (\text{N.2})$$

où, conformément à VDI/VDE 2648, référence [5]:

α est l'angle à mesurer (valeur d'étalonnage);
 e est l'excentricité;
 R est le rayon effectif de la mesure de l'angle.

En prenant pour hypothèse que l'excentricité des axes de rotation est égale à 0,2 mm et que le rayon est égal à 50 mm, l'incertitude du cas extrême de $\alpha = 180^\circ$ est $0,2^\circ$.

N.9.3 Contribution à l'incertitude de mesure par le capteur de direction du vent

N.9.3.1 Généralités

Les capteurs de direction du vent peuvent avoir différents signaux de sortie. Il existe également des capteurs numériques qui indiquent directement l'angle d'azimut en degrés. En règle générale, l'éprouvette est un capteur de direction du vent avec un signal de sortie analogique (courant ou tension) ou un capteur potentiométrique.

N.9.3.2 Contribution à l'incertitude par le signal de sortie numérique α_{Digital}

Par hypothèse, la moitié de la résolution numérique contribue à l'incertitude de mesure.

N.9.3.3 Contribution à l'incertitude de mesure par le signal de sortie analogique α_{Analog}

Les capteurs dont le signal est analogique (généralement 10 V ou 20 mA) sont censés contribuer à l'incertitude avec la résolution de la conversion analogique-numérique. En prenant pour hypothèse un système de mesure dont la résolution est de 12 bits, la contribution d'incertitude est $360^\circ / 4096 = 0,1^\circ$. En prenant pour hypothèse une distribution rectangulaire, la contribution à l'incertitude-type totale est $0,06^\circ$.

N.9.3.4 Contribution à l'incertitude par la détermination de la résistance ohmique d'un capteur de direction du vent α_{Ω}

La résistance d'une girouette potentiométrique peut uniquement être déterminée à l'aide de la mesure connue d'une tension/d'un courant. Lors de la détermination de la résistance d'une girouette potentiométrique (en général, plusieurs k Ω) à l'aide d'une mesure indirecte de la résistance de tension et stabilisée en courant, les incertitudes suivantes peuvent se produire:

- pourcentage d'erreur du shunt de l'instrument 0,030 %;
- courant d'erreur traversant le système de mesure 0,020 %;

Le calcul de l'incertitude-type de mesure pour la détermination de la direction de l'écoulement est réalisé à l'aide de la sommation quadratique:

$$u_{\text{Flow\_dir}} = (u_{\text{CL}}^2 + u_{\text{DIR}}^2 + u_{\text{REF}}^2 + u_{\text{Incl.1}}^2 + u_{\text{EXZ1}}^2)^{0,5} \quad (\text{N.3})$$

$$u_{\text{Flow\_dir}} = (0,06^2 + 0,06^2 + 0,2^2 + 0,01^2 + 0,12^2)^{0,5} = 0,25^\circ \quad (\text{N.4})$$

Tableau N.2 – Contributions d'incertitude et incertitude-type totale d'étalonnage du capteur de direction du vent

Facteur	Catégorie d'incertitude	Distribution d'incertitude	Coefficient de sensibilité	Incertitude de mesure	Ecart-type	Contribution à l'incertitude	Unité
Signal de sortie numérique	B	2	1	moitié de la résolution numérique	$u_{\text{Digital}} = \frac{1}{2} \cdot \text{LSB}$	-	°
Ou signal de sortie analogique	B	2	1	0,1	$u_{\text{Analog}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{ANALOG}$	0,06	°
Ou capteur potentiométrique	B	1	1	0,2	$u_{\Omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Omega$	0,12	°
Montage du capteur	B	1	1	0,25	$u_{\text{Mounting}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Mounting}$	0,15	°
Angle d'inclinaison	B	2	1	0,01	$u_{\text{INCL.2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{INCL.2}$	0,01	°
Excentricité	B	2	1	0,2	$u_{\text{EXZ2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{EXZ2}$	0,12	°
1 = distribution normale; 2 = distribution rectangulaire							

Par exemple, l'incertitude-type totale d'une girouette potentiométrique est la suivante:

$$u_{\text{Total}} = (u_{\text{Flow\_dir}}^2 + u_{\Omega}^2 + u_{\text{Mounting}}^2 + u_{\text{Incl.2}}^2 + u_{\text{Exz2}}^2)^{0,5} \quad (\text{N.5})$$

$$u_{\text{Total}} = (0,25^2 + 0,12^2 + 0,15^2 + 0,01^2 + 0,12^2)^{0,5} = 0,34^\circ \quad (\text{N.6})$$

Pour une girouette potentiométrique, la contribution des sources d'incertitude individuelles à l'incertitude-type totale aboutit ainsi à une incertitude-type totale de 0,34° pour $k=1$. En règle générale, cette valeur est multipliée par le facteur de couverture $k=2$.

Annexe O (informative)

Essai de performance de puissance dans un climat froid

O.1 Généralités

Pour différentes raisons, la réalisation de l'essai de performance de puissance à des températures inférieures à 0 °C peut être souhaitable. Par exemple, de basses températures peuvent être fréquentes ou il pourrait exister un besoin de déterminer la dégradation de la performance de puissance à cause du givrage des pales.

L'Annexe O donne les lignes directrices relatives aux aspects qu'il est important d'étudier et de donner des recommandations lors de la réalisation des essais de performance de puissance dans des climats froids.

O.2 Recommandations

O.2.1 Généralités

Il est recommandé d'utiliser des capteurs de mesure de la vitesse du vent qui ne sont pas susceptibles de givrer, comme des anémomètres à coupelles chauffés, des anémomètres à ultrasons chauffés et des dispositifs de télédétection, ou bien d'utiliser des détecteurs de givrage adaptés afin de surveiller de manière fiable la présence de givre et de filtrer les données en conséquence.

Il convient que le matériel d'essai de performance de puissance dans un climat froid inclue une détection fiable du givrage. Il existe plusieurs possibilités pour détecter le givre, notamment les détecteurs de givrage atmosphérique, les détecteurs de givrage des instruments, l'observation ou d'autres méthodes similaires. L'accumulation de givre se produit à des températures inférieures ou proches de zéro. L'essai de performance de puissance à des températures amplement inférieures à 0 °C pourrait donc être réalisé sans grande difficulté, sous réserve d'utiliser des instruments et des méthodes adaptés.

L'accumulation de givre sur des supports et des structures de montage peut avoir un effet significatif sur les conditions d'écoulement de l'anémomètre. Il est essentiel d'éviter de telles situations. Une évaluation ou une surveillance exhaustive des conditions est exigée. Il est recommandé d'utiliser des structures suffisamment chauffées à proximité des instruments afin d'éviter l'accumulation de givre.

O.2.2 Anémomètres à ultrasons

Pour l'essai de performance de puissance, les anémomètres à ultrasons sont admis à condition d'appliquer des procédures d'étalonnage et de classification adaptées conformément à l'Annexe F, l'Annexe I et à l'Article J.4.

Les anémomètres à ultrasons qui disposent des aptitudes de chauffage suffisantes peuvent être utilisés. En effet, ils ne sont pas équipés de parties mobiles et sont donc adaptés à une utilisation dans un climat froid.

O.2.3 Anémomètres à coupelles

La limite inférieure de température pour les anémomètres de classe A peut être étendue de 0 °C à –30 °C si le chauffage de l'arbre (palier) est correct. Cela n'élimine en rien la nécessité de détecter le givre.

Pour cette classe, la plage de températures peut être étendue en dessous de la limite inférieure sous réserve qu'il puisse être démontré que les effets dus au frottement peuvent être évalués et pris en considération.

La classification d'un anémomètre dont la plage de températures est étendue peut être réalisée par extension de la plage de températures donnée à l'Annexe J sous réserve que les mesures de frottement du palier couvrent la totalité de la plage de températures.

O.3 Incertitudes

Plage de températures étendue: donnée par la classe S.

O.4 Rapports

En supplément des exigences de rapport normales, les précautions adoptées pour garantir que les instruments utilisés pour mesurer la vitesse du vent ne sont pas affectés par le givre et que les effets des basses températures sur la mesure de la vitesse du vent sont pris en compte.

Il convient de documenter individuellement le filtrage des conditions de givre. Les résultats de l'essai de performance de puissance avec et sans étude de l'extension des températures doivent être consignés.

Annexe P (informative)

Procédure de normalisation du cisaillement du vent

P.1 Généralités

Pour déduire une courbe de puissance spécifique au climat, l'influence du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent sur la courbe de puissance doit être prise en considération en normalisant la vitesse du vent à la hauteur du moyeu à des valeurs de référence prédéfinies de cisaillement du vent et de déviation de la trajectoire du vent. Le profil de cisaillement du vent et de déviation de la trajectoire du vent de référence peut adopter toutes les formes et peut être défini en fonction de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Par exemple, le cisaillement du vent et la déviation de la trajectoire du vent de référence pourraient refléter les conditions prévues sur le site d'essai de courbe de puissance si l'objectif de l'essai de courbe de puissance consiste à vérifier une courbe de puissance garantie qui est spécifiée pour les mêmes conditions de référence. Sauf indication contraire, un profil de cisaillement du vent selon la loi exponentielle avec un exposant de cisaillement de 0,2 et une déviation de la trajectoire de 0° pour toute la plage de hauteurs du rotor de l'éolienne doit être appliqué.

La vitesse du vent à la hauteur du moyeu doit être normalisée par rapport au cisaillement du vent et à la déviation de la trajectoire du vent de référence à l'aide du concept de vitesse du vent équivalente du rotor. L'énergie cinétique du vent au sein de la plage de hauteurs du rotor est la suivante:

$$P_{\text{kin}} = \int_A \frac{1}{2} \rho (V \cos(\varphi - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA \quad (\text{P.1})$$

et la vitesse du vent équivalente du rotor qui correspond à l'énergie cinétique est:

$$V_{\text{eq}} = \left(\frac{1}{A} \int_i (V_i \cos(\varphi_i - \varphi_{\text{hub}}))^3 dA_i \right)^{1/3} \quad (\text{P.2})$$

Le rapport entre la vitesse du vent équivalente du rotor et la vitesse du vent à la hauteur du moyeu caractérise la forme du profil de cisaillement du vent et du profil de déviation de la trajectoire du vent pertinents pour la description de l'énergie cinétique disponible pour une vitesse du vent donnée à la hauteur du moyeu. Ce rapport est appelé facteur de correction du cisaillement du vent:

$$f_r = \frac{V_{\text{eq}}}{V_h} \quad (\text{P.3})$$

Une même vitesse du vent équivalente du rotor peut être obtenue à l'aide de différentes combinaisons de vitesses du vent à la hauteur du moyeu et de conditions de cisaillement du vent/de déviation de la trajectoire du vent, par exemple: le cisaillement/la déviation de la trajectoire du vent et la vitesse du vent à la hauteur du moyeu pour une période de 10 min lors de l'essai de courbe de puissance, ou encore le cisaillement/la déviation de la trajectoire du vent de référence et une vitesse du vent à la hauteur du moyeu correspondante (ici nommée vitesse du vent normalisée):

$$V_{\text{eq}} = f_{r,\text{measured}} \cdot V_{h,\text{measured}} = f_{r,\text{reference}} \cdot V_{h,\text{normalised}} \quad (\text{P.4})$$

Par conséquent, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu normalisée au cisaillement du vent/à la déviation de la trajectoire du vent doit être calculée pour chaque période de 10 min de la manière suivante:

$$V_{h,\text{normalised}} = \frac{V_{\text{eq}}}{f_{r,\text{reference}}} \quad (\text{P.5})$$

ou de la manière suivante:

$$V_{h,\text{normalised}} = \frac{f_{r,\text{measured}}}{f_{r,\text{reference}}} \cdot V_{h,\text{measured}} \quad (\text{P.6})$$

Pour un facteur de correction du cisaillement du vent de référence de 1 ($f_{r,\text{reference}} = 1$), c'est-à-dire en l'absence de cisaillement et de déviation de la trajectoire, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu normalisée est égale à la vitesse du vent équivalente du rotor. L'incertitude de mesure de la vitesse du vent normalisée en fonction du cisaillement et de la déviation de la trajectoire doit être évaluée conformément à l'Article E.8 et à E.11.2.2 et E.11.2.3. Il est à noter que la vitesse du vent équivalente du rotor peut surestimer l'énergie éolienne effective utilisable par les grandes éoliennes en cas de cisaillement du vent élevé. Ainsi, une incertitude de méthode correspondant à un tiers de la correction de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu doit être appliquée sous forme d'incertitude supplémentaire ajoutée à l'incertitude de mesure de la vitesse du vent normalisée en fonction du cisaillement et de la déviation de la trajectoire.

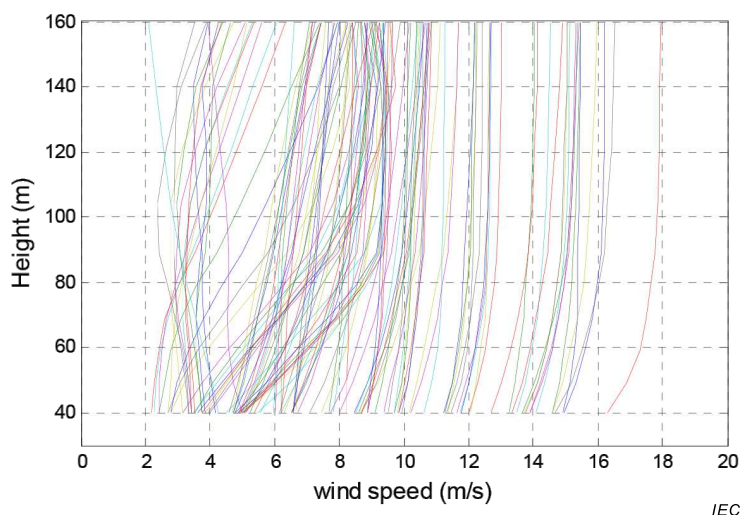
Dans certaines conditions, l'évaluation du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent sur la plage de hauteurs du rotor de l'éolienne peut ne pas être possible, parce qu'aucune mesure de la vitesse du vent ou de la direction du vent n'est disponible sur cette plage de hauteurs ou parce qu'il n'est pas possible de réaliser un étalonnage de la vitesse du vent et de la direction du vent sur le site à des hauteurs différentes de celle du moyeu. Dans ce cas, l'absence d'intégration du cisaillement/de la déviation de la trajectoire du vent dans l'évaluation de la courbe de puissance doit être prise en compte selon E.11.2.2.2 et E.11.2.3.2 pour les conditions souhaitées de cisaillement/déviation de la trajectoire de référence du vent. En outre, une incertitude de méthode correspondant à un tiers de la correction de la vitesse du vent virtuelle dans les conditions de cisaillement/déviation de la trajectoire du vent prises pour hypothèse lors de l'essai de courbe de puissance doit être prise en considération pour les conditions souhaitées de cisaillement/déviation de la trajectoire de référence.

Annexe Q (informative)

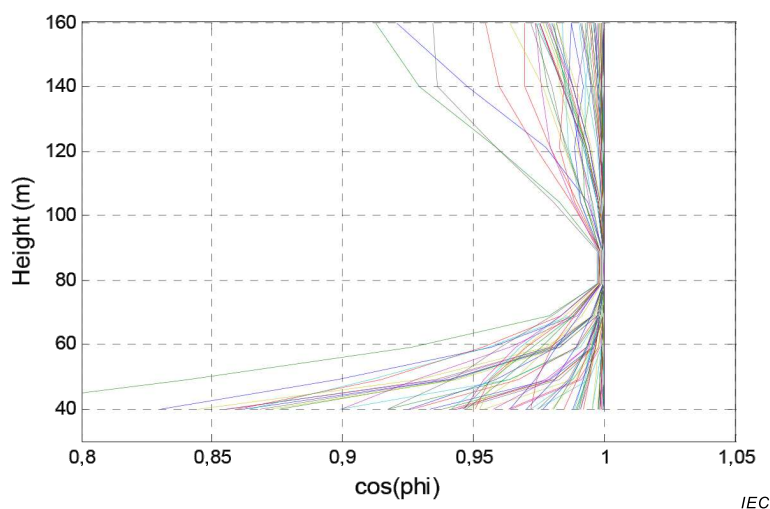
Définition de la vitesse du vent équivalente du rotor en prenant en compte la déviation de la trajectoire du vent

Q.1 Généralités

La vitesse du vent à la hauteur du moyeu n'est pas systématiquement représentative du vent sur l'ensemble du rotor. La vitesse et la direction du vent peuvent subir des variations considérables en raison de la stabilité atmosphérique et/ou de l'influence du terrain. La Figure Q.1 représente des profils de vent mesurés à l'aide d'un dispositif LIDAR sur un terrain plat, ainsi que le cosinus des variations de direction du vent par rapport à une hauteur du moyeu prise pour hypothèse. Il est observé que la composante de vitesse du vent perpendiculaire au rotor de l'éolienne à une hauteur spécifique sera parfois beaucoup moins élevée que la vitesse du vent à cette même hauteur.



a) Profils de vents mesurés par un dispositif LIDAR



b) Cosinus de l'angle de variation de la direction du vent par rapport à la hauteur

Anglais	Français
Height (m)	Hauteur (m)
Wind speed (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
Cos(phi) ()	Cos(phi) ()

Figure Q.1 – Profils de vent mesurés à l'aide d'un dispositif LIDAR sur un terrain plat

Le rendement énergétique du rotor de l'éolienne dépendra donc à la fois du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent du profil spécifique. L'utilisation de la courbe de puissance calculée à partir de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu ignore à la fois le cisaillement du vent et la déviation de la trajectoire du vent. La courbe de puissance obtenue d'après la vitesse du vent équivalente du rotor dépend moins du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent que la courbe de puissance obtenue d'après la vitesse du vent à la hauteur du moyeu.

Q.2 Définition de la vitesse du vent équivalente du rotor en prenant en compte la déviation de la trajectoire du vent

La vitesse du vent équivalente du rotor est la vitesse du vent correspondant au flux d'énergie cinétique qui traverse la surface balayée par le rotor, compte tenu du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent. Lorsqu'au moins trois hauteurs de mesure sont disponibles (voir 7.2.6), la vitesse du vent équivalente du rotor est définie comme suit:

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n (v_i \cos(\varphi_i))^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad (Q.1)$$

où

n est le nombre de hauteurs de mesure disponibles ($n \geq 3$);

v_i est la vitesse du vent mesurée à la hauteur i ;

φ_i est la différence d'angle entre la direction du vent à la hauteur du moyeu et le segment i ;

A est la surface balayée par le rotor (c'est-à-dire, πR^2 avec le rayon R);

A_i est la surface du i^e segment, c'est-à-dire le segment représenté par la vitesse du vent v_i (voir 9.1.3.2, Equation (6)).

Q.3 Mesure de la déviation de la trajectoire du vent

La vitesse du vent équivalente du rotor définie par l'Equation (Q.1) est influencée par les mesures de la différence entre les directions du vent à plusieurs hauteurs par rapport à la hauteur du moyeu. Afin d'assurer la précision des mesures de la différence entre les directions du vent, il est important de mesurer les directions du vent à différentes hauteurs avec le même type de capteur, c'est-à-dire avec un dispositif de télédétection effectuant les mesures à toutes les hauteurs ou avec les mêmes capteurs sur le mât météorologique à toutes les hauteurs.

Q.4 Normalisation du cisaillement du vent et de la déviation de la trajectoire du vent combinés

Les procédures décrites à l'Annexe P peuvent être étendues au référencement à la courbe de puissance mesurée pour référencer les conditions de déviation de la trajectoire du vent, en prenant également en considération un profil de déviation de la trajectoire du vent de référence en supplément du profil de cisaillement du vent de référence. Les profils de référence doivent être intégrés sur la surface du rotor conformément à l'Equation (Q.1).

Annexe R (informative)

Considérations relatives aux incertitudes pour les essais sur plusieurs éoliennes

R.1 Généralités

L'Annexe R traite des considérations relatives aux incertitudes qui apparaissent lors de la compilation des résultats d'essai de plusieurs éoliennes. Lors d'essais sur plusieurs éoliennes, les grandeurs étudiées sont généralement l'*AEP* moyenne de l'échantillon et l'incertitude sur cette moyenne. L'*AEP* moyenne peut être déterminée très simplement en prenant une simple moyenne des *AEP* de chaque éolienne.

La détermination de l'incertitude de l'*AEP* moyenne n'est pas aussi directe. Dans la mesure où ce problème se pose fréquemment, la présente norme définit une approche informative de la manière dont cette incertitude peut être estimée. Le cadre mathématique de cette approche est identique à celui expliqué à l'Annexe I et à l'Annexe J de l'IEC 61400-12-2:2013. Il ne sera donc pas répété ici. La différence observée dans la présente norme concerne le Tableau R.1 des corrélations estimées entre les essais sur différentes éoliennes et les résultats représentés aux Figures J.1 et J.2 de l'IEC 61400-12-2:2013, qui seront reproduits ici. A titre d'introduction, une brève exposition du problème sera répétée.

Une approche possible de la composition des incertitudes consiste à faire une simple moyenne des incertitudes de chaque essai. Toutefois, cette simple moyenne ne parvient pas à rendre compte du principal avantage des essais multiples, à savoir une diminution de l'incertitude composée des essais. Une seconde approche consiste à calculer l'incertitude-type de la moyenne des incertitudes.

$$u_{AEP_{AVG}} = \frac{1}{L} \sqrt{\sum_{i=1}^L u_{AEP,i}^2} \quad (R.1)$$

où

$u_{AEP_{AVG}}$ ⁴³ est l'incertitude sur l'*AEP* moyenne;

$u_{AEP,i}$ est l'incertitude sur l'*AEP* pour l'éolienne *i*;

L est le nombre d'éoliennes à l'essai.

L'Equation (R.1) prend pour hypothèse une indépendance complète entre les résultats d'essai sur chacune des éoliennes, ce qui signifie qu'il n'y a pas de corrélation entre les résultats d'essai individuels d'une unité à la suivante. Par conséquent, l'application de l'Equation (R.1) conduirait à sous-estimer l'incertitude de l'*AEP* moyenne. Afin évaluer précisément l'incertitude de l'*AEP* moyenne, il est donc nécessaire d'identifier une méthode pratique de traitement des composantes d'incertitude corrélées. L'approche suggérée est fondée sur la publication informative de l'ISO intitulée '*Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*', avec des ajustements mineurs concernant la gestion de la corrélation.

⁴³ Il est à noter que l'équation présentée ici diffère légèrement de l'équation donnée dans l'IEC 61400-12-2. Il s'agit de l'incertitude d'une moyenne et la division par $1/L$ est une transformation linéaire, donc $1/L^2$ se situe sous la racine carrée ou $1/L$ se place devant la racine carrée.

Tableau R.1 – Liste des composantes d'incertitude corrélées

Paramètre mesuré	Source	Coefficient de corrélation	Condition	Plage de valeurs	Notes
Puissance électrique	Transformateurs de courant	$\rho_{up1,m,n}$	Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	0,9 0,1	Les C_T de la même marque ont tendance à produire des valeurs d'erreur de catégorie B similaires par rapport à la valeur vraie.
	Transformateurs de tension	$\rho_{up2,m,n}$	Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	0,9 0,1	Les V_T de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires. Une mesure directe de la tension élimine cette incertitude.
	Transducteur de puissance ou dispositif de mesure de puissance	$\rho_{up3,m,n}$	Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	0,9 0,1	Les dispositifs de mesure de puissance de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires.
	Mesure de puissance dynamique	$\rho_{up4,m,n}$	Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	0,9 0,1	Les dispositifs de mesure de puissance de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires.
	Acquisition de données	$\rho_{udp,m,n}$	Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	0,9 0,1	Des dispositifs d'acquisition de données de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires par rapport à la valeur vraie.
Vitesse du vent	Étalonnage de l'anémomètre	$\rho_{uv1,m,n}$	Instrument partagé (même mât météorologique)	1,0	La référence et la méthode d'étalonnage produisent une erreur de catégorie B similaire.
			Différents mâts, même marque/modèle, même laboratoire d'étalonnage	0,9	
			Différents mâts, marque/modèle différents, même laboratoire d'étalonnage	0,7	
			Différents mâts, même marque/modèle, différents laboratoires d'étalonnages	0,4	
			Différents mâts, marque/modèle différents, différents laboratoires d'étalonnages	0,1	
	Post-étalonnage/Etalonnage in situ	$\rho_{uv2,m,n}$	Instrument partagé (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,7	Les anémomètres de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires par rapport à la valeur vraie.
	Incertitude opérationnelle	$\rho_{uv3,m,n}$	Instrument partagé (même mât) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,8	Les anémomètres de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires par rapport à la valeur vraie.

Paramètre mesuré	Source	Coefficient de corrélation	Condition	Plage de valeurs	Notes
	Effets du montage	$\rho_{uv4,m,n}$	Selon la spécification de la présente norme	0,9	Le montage similaire exigé pour l'utilisation d'une fonction de transfert donnée conduit à une incertitude corrélée.
	Acquisition de données	$\rho_{uv5,m,n}$	Acquisition de données partagée	1,0	Plus le montage sera similaire, plus l'acquisition de données sera corrélée.
			Différentes acquisitions de données de même marque, même conception	0,9	
			Différentes acquisitions de données de marque différente, même conception	0,7	
			Différentes acquisitions de données de même marque, différentes conceptions	0,5	
			Différentes acquisitions de données de marque différente, différentes conceptions	0,2	
	Distorsion de l'écoulement due au terrain sans étalonnage du site	$\rho_{uv6,m,n}$	Les deux éoliennes situées à une distance comprise entre 2D et 3D (ou 3D et 4D) du mât météorologique	0,9	Une augmentation de la complexité du terrain et une variation du terrain entre les unités d'essai tendront à produire des erreurs de catégorie B différentes sur la vitesse du vent par rapport à la valeur vraie; la distance joue un rôle important.
			Une éolienne située à une distance comprise entre 2D et 3D et une éolienne entre 3D et 4D	0,6	
	Distorsion de l'écoulement due au terrain entre les unités d'essai avec étalonnage du site, étalonnage de l'anémomètre	$\rho_{uv7,m,n}$	Instrument partagé (même mât météorologique)	1,0	
			Différents mâts, même marque/modèle, même laboratoire d'étalonnage	0,9	
			Différents mâts, marque/modèle différents, même laboratoire d'étalonnage	0,7	
			Différents mâts, même marque/modèle, différents laboratoires d'étalonnages	0,4	
			Différents mâts, marque/modèle différents, différents laboratoires d'étalonnages	0,1	
	Distorsion de l'écoulement due au terrain entre les unités d'essai avec étalonnage du site, incertitude opérationnelle	$\rho_{uv7,m,n}$	Instruments partagés (mêmes mâts)	1,0	
			Différents mâts, même marque/modèle	0,9	
			Différents mâts, marque/modèle différents	0,7	

Paramètre mesuré	Source	Coefficient de corrélation	Condition	Plage de valeurs	Notes
	Acquisition de données pour l'étalonnage du site	$\rho_{udv,m,n}$	Acquisition de données partagée Différentes acquisitions de données de même marque, même conception Différentes acquisitions de données de marque différente, même conception Différentes acquisitions de données de même marque, différentes conceptions Différentes acquisitions de données de marque différente, différentes conceptions	1,0 0,9 0,7 0,5 0,2	Des dispositifs d'acquisition de données de la même marque ont tendance à avoir une erreur de catégorie B similaire.
Température	Capteur de température	$\rho_{ut1,m,n}$	Instruments partagés (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,1	Des dispositifs de mesure de température de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires.
	Protection contre le rayonnement	$\rho_{ut2,m,n}$	Instruments partagés (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,6	Les protections contre le rayonnement ont tendance à produire les mêmes erreurs de méthode par rapport à la valeur vraie.
	Effets du montage	$\rho_{ut3,m,n}$	Instruments partagés (même mât météorologique) Même emplacement et même montage Emplacement ou montage différents	1,0 0,9 0,1	
	Acquisition de données	$\rho_{udt,m,n}$	Instruments partagés (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	0,9 0,1	Des dispositifs d'acquisition de données de la même marque ont tendance à avoir une erreur de catégorie B similaire.
Pression	Capteur de pression	$\rho_{ub1,m,n}$	Instrument partagé (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,1	Des dispositifs de mesure de pression de la même marque ont tendance à produire des erreurs de catégorie B similaires.
	Effets du montage	$\rho_{ub2,m,n}$	Instrument partagé (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,1	Si plusieurs instruments sont utilisés, le montage sera vraisemblablement similaire.
	Acquisition de données	$\rho_{ubd,m,n}$	Instrument partagé (même mât météorologique) Même marque d'instrument Marque d'instrument différente	1,0 0,9 0,1	Des dispositifs d'acquisition de données de la même marque ont tendance à avoir une erreur de catégorie B similaire.

Paramètre mesuré	Source	Coefficient de corrélation	Condition	Plage de valeurs	Notes
Méthode	Correction de la masse volumique de l'air	$\rho_{um1,m,n}$	Même méthodologie de correction pour toutes les éoliennes	1,0	
	Conditions de vent	$\rho_{um2,m,n}$	Mêmes conditions pour différentes éoliennes	1,0	
	Variations saisonnières	$\rho_{um3,m,n}$	L'essai s'effectue pendant les mêmes périodes de l'année L'essai s'effectue pendant des périodes de l'année différentes	1,0 0,6	
Statistiques	Variations de la puissance électrique	$\rho_{sp,m,n}$		0,0	Intrinsèquement aléatoire et indépendante.

Annexe S (informative)

Correction de la distorsion de l'écoulement au niveau du mât pour les mâts en treillis

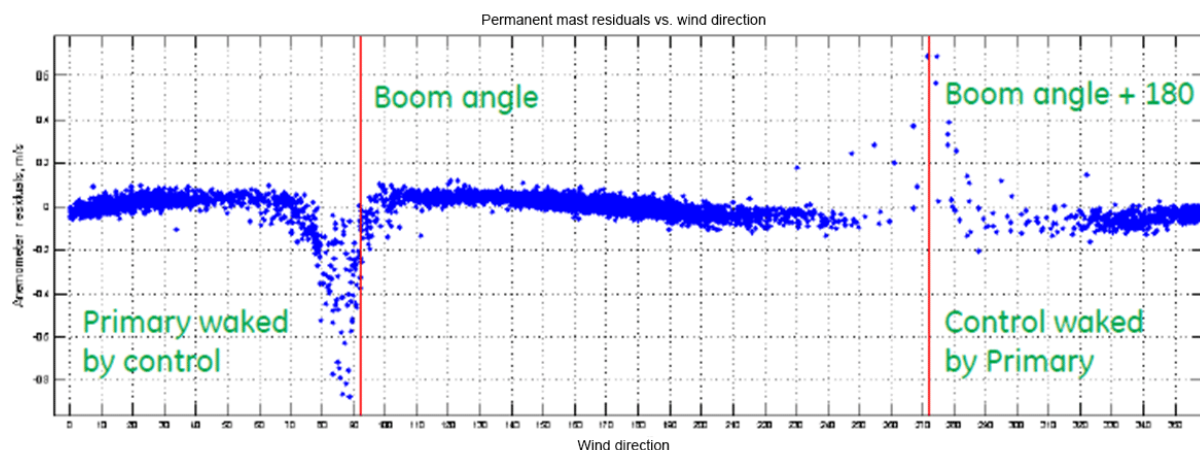
L'Annexe S donne les lignes directrices relatives à une méthode possible de détermination d'une correction de la distorsion de l'écoulement des anémomètres montés latéralement. Cette correction a déjà été traitée en 7.2.4 et en 9.1.2. La présente annexe présente une approche plus approfondie pour les mâts en treillis.

Une méthode similaire peut fonctionner pour d'autres types de configurations de mâts, mais il peut être nécessaire de procéder à des modifications spécifiques pour permettre les différences de configuration. D'autres méthodes de détermination d'une correction peuvent être appliquées. En revanche, elles doivent être documentées de manière suffisamment détaillée pour qu'un tiers puisse reproduire les résultats d'après les informations consignées.

Le point de départ consiste à effectuer une régression linéaire entre deux anémomètres installés sur différentes flèches à la même hauteur de mesure. Les résidus de la régression peuvent être déterminés et tracés par rapport à la direction du vent pour la totalité du secteur allant de 0° à 360°. D'autres filtres peuvent être appliqués afin de garantir la qualité des données. Normalement, ce tracé montrera deux éléments:

- a) pour des directions spécifiques, des distorsions de l'écoulement considérables seront visibles et les sillages engendrés par le fonctionnement du mât, des haubans ou d'autres capteurs seront indiqués;
- b) une onde sinusoïdale qui varie lentement est normalement visible avec une période de 360°.

Un exemple est donné à la Figure S.1 ci-dessous. Cet exemple est destiné à une conception en poteaux de but pour la tête de mât, mais il représente le comportement du signal prévu. Comme l'indique le graphique, il peut être avantageux de tracer également les sillages prévus déterminés à partir du montage géométrique, ce qui facilitera l'interprétation correcte du tracé. Il convient de prêter une attention particulière aux sillages engendrés par les mâts, les haubans et d'autres capteurs lorsqu'ils sont trop nombreux et/ou trop forts. En effet, ces sillages peuvent éclipser l'onde sinusoïdale étudiée et par conséquent rendre l'application de cette méthode peu pratique, voire impossible.



IEC

Anglais	Français
Permanent mast residuals vs. wind direction	Résidus du mât permanent en fonction de la direction du vent
Anemometer residuals (m/s)	Résidus de l'anémomètre (m/s)
Wind direction	Direction du vent
Boom angle	Angle de la flèche
Boom angle + 180	Angle de la flèche + 180
Primary waked by control	Anémomètre primaire sous l'effet du sillage de l'anémomètre de commande
Control waked by primary	Anémomètre de commande sous l'effet du sillage de l'anémomètre primaire

Figure S.1 – Exemple de distorsion de l'écoulement au niveau du mât

L'onde sinusoïdale représente la distorsion de l'écoulement à partir du mât et d'autres matériels à la hauteur de mesure à corriger. Pour cela, des valeurs appropriées sont choisies pour les paramètres de l'équation suivante:

$$V_1 = m \cdot V_2 + B + A \sin(WD + Centre) \quad (S.1)$$

où

V_1 est la vitesse du vent mesurée par le premier capteur;

V_2 est la vitesse du vent mesurée par le second capteur;

m est la pente de la régression entre V_1 et V_2 ;

B est le décalage de la régression entre V_1 et V_2 ;

A est un paramètre de mise à l'échelle;

WD est la direction du vent.

Centre correspond à la direction du vent pour laquelle il est prévu que les résidus soient nuls. Dans les exemples ci-dessus affichant des angles de flèche de 92° et 272°, *Centre* = 182°. La Figure G.3, la Figure G.6 et la Figure G.8 peuvent être utiles pour évaluer les directions dans lesquelles la distorsion de l'écoulement est égale aux deux emplacements des capteurs. Les solutions les plus utiles se trouvent au sein du secteur de mesure (ou le plus proche possible).

A est un paramètre de mise à l'échelle qui doit être résolu. A peut être trouvé par itération, en définissant d'abord A sur zéro, puis en choisissant un autre point de données (en restant éloigné des données des sillages), la valeur du courant peut être déterminée pour les résidus. Le graphique ci-dessus affiche une valeur de résidus de 0,03 à 150° et de 0 à 182°. A présent, soit $Centre = 182^\circ$, et soit exigée une valeur nulle pour V_I à 150°. La valeur déterminée pour A est alors 0,06 (un signe négatif est à noter pour le sinus à un angle de $150^\circ + 180^\circ = 330^\circ$). Une vérification plus approfondie à l'aide d'autres points est recommandée afin de garantir que la valeur de A est correcte et qu'elle n'est pas fondée sur des données aberrantes accidentelles.

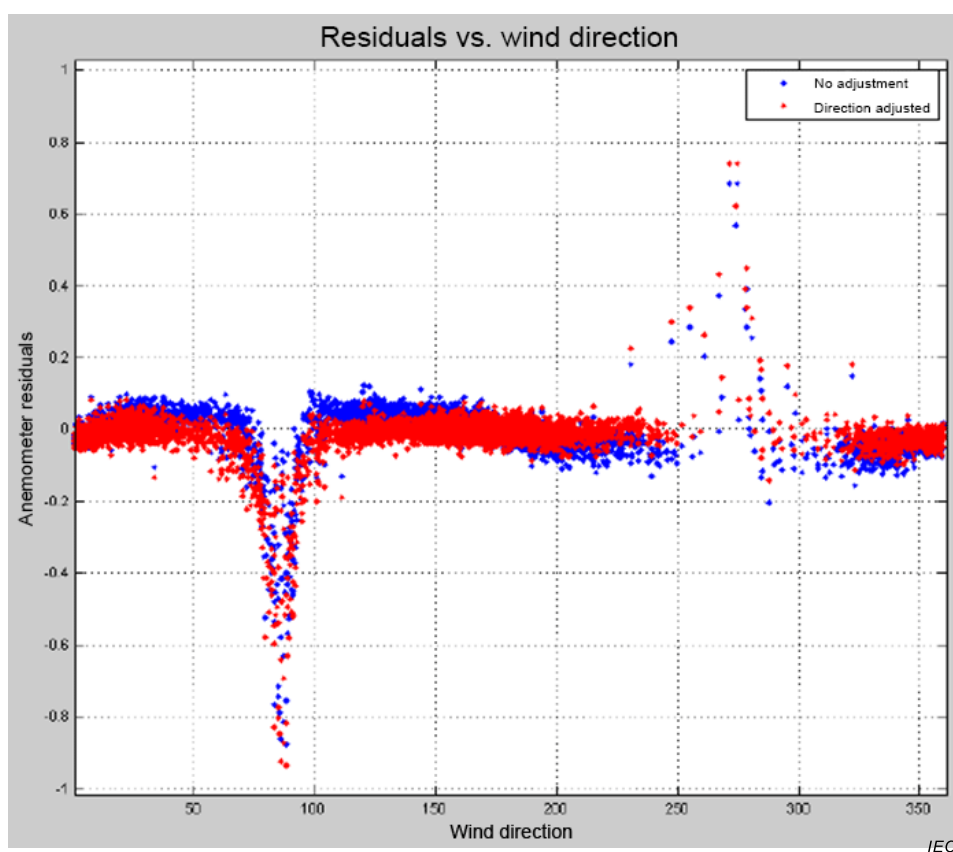
A reflète l'amplitude de l'effet de somme de la distorsion de l'écoulement au niveau des deux anémomètres. Par conséquent, la vitesse du vent pour chaque anémomètre doit être corrigée de la moitié de l'amplitude A conformément aux Equations (S.2) et (S.3) ci-dessous:

$$V_{1\text{corr}} = V_1 + \frac{A}{2} \sin(WD + Centre) \quad (\text{S.2})$$

$$V_{2\text{corr}} = V_2 - \frac{A}{2} \sin(WD + Centre) \quad (\text{S.3})$$

La correction de la distorsion de l'écoulement présentée ici ne ramène pas la distorsion de l'écoulement à une valeur nulle, mais la normalise seulement à la direction dans laquelle l'effet de la distorsion de l'écoulement est le même au niveau des deux anémomètres. La direction dans laquelle la distorsion de l'écoulement est nulle peut être estimée à partir des graphiques de vitesse d'écoulement de l'Article G.4 et la correction finale de l'écoulement peut être ajustée en fonction.

Les valeurs des vitesses du vent peuvent désormais être utilisées pour recalculer les résidus, lesquels peuvent être indiqués dans le même graphique afin de représenter l'amélioration. Les résidus du signal après correction (en rouge) dépendent nettement moins de la direction du vent que le signal d'origine (en bleu), comme l'illustre la Figure S.2.



Anglais	Français
Residuals vs. wind direction	Résidus en fonction de la direction du vent
Anemometer residuals	Résidus de l'anémomètre
Wind direction	Direction du vent
No adjustment	Aucun ajustement
Direction adjusted	Direction ajustée

Figure S.2 – Résidus de la distorsion de l'écoulement en fonction de la direction

Bibliographie

- [1] IEC 61400-1:2005, *Eoliennes – Partie 1: Exigences de conception*
IEC 61400-1:2005/AMD1:2010
IEC 61400-1:2005/AMD1:2010
- [2] IEC 61400-2:2013, *Eoliennes – Partie 2: Petits aérogénérateurs*
- [3] IEC 61400-12-2, *Eoliennes – Partie 12-2: Performance de puissance des éoliennes de production d'électricité basée sur l'anémométrie de nacelle*
- [4] ISO 16622, *Météorologie – Anémomètres/thermomètres soniques – Méthodes d'essai d'acceptation pour les mesurages de la vitesse moyenne du vent*
- [5] VDI/VDE 2648, *Transducers and measuring systems for measurement of angle* (disponible en anglais seulement)
- [6] JCGM 200:2012, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*, 3^e édition
- [7] ACCUWIND – *Methods for classification of cup anemometers*, J-Å DAHLBERG, T.F. PEDERSEN, P. BUSCHE, Risø-R-1555 (EN), mai 2006 (disponible en anglais seulement)
- [8] ACCUWIND – *Classification of five cup anemometers according to IEC 61400-12-1*, T.F. PEDERSEN, J-Å DAHLBERG, P. BUSCHE, Risø-R-1556 (EN), mai 2006 (disponible en anglais seulement)
- [9] *Quantification of linear torque characteristics of cup anemometers with step responses*, T.F. PEDERSEN, Risø-I-3131 (EN), février 2011 (disponible en anglais seulement)
- [10] *Wind shear proportional errors in the horizontal wind speed send by focused range gated lidars*, LINDELOW et al., IOP conf. Series: Earth and Env. Sc., Vol. 1, 2008 (disponible en anglais seulement)
- [11] *Modelling conically scanning lidar error in complex terrain with WAsP engineering*, BINGÖL, F., MANN, J., and FOUSSEKIS, D., Riso-R-1664(EN), 2008 (disponible en anglais seulement)
- [12] *How to Gain Acceptance for Lidar Measurements*, ALBERS, A., JANSSEN, A.W., MANDER, J., Proceedings of German Wind Energy Conference, 2010 (disponible en anglais seulement)
- [13] *Turbulence and Shear Normalisation of Wind Turbine Power Curve*, ALBERS, A., Proceedings of European Wind Energy Conference, 2010 (disponible en anglais seulement)
- [14] *Turbulence Normalisation of Wind Turbine Power Curve Measurements*, ALBERS, A., Report PP09037, Deutsche WindGuard (disponible en anglais seulement)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch