

INTERNATIONAL
STANDARD

IEC
CEI

NORME
INTERNATIONALE

60068-3-11

First edition
Première édition
2007-05

Environmental testing –

**Part 3-11:
Supporting documentation and guidance –
Calculation of uncertainty of conditions
in climatic test chambers**

Essais d'environnement –

**Partie 3-11:
Documentation d'accompagnement et guide –
Calcul de l'incertitude des conditions
en chambres d'essais climatiques**



Reference number
Numéro de référence
IEC/CEI 60068-3-11:2007



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2007 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL
STANDARD

IEC
CEI

NORME
INTERNATIONALE

60068-3-11

First edition
Première édition
2007-05

Environmental testing –

**Part 3-11:
Supporting documentation and guidance –
Calculation of uncertainty of conditions
in climatic test chambers**

Essais d'environnement –

**Partie 3-11:
Documentation d'accompagnement et guide –
Calcul de l'incertitude des conditions
en chambres d'essais climatiques**



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

PRICE CODE
CODE PRIX

V

*For price, see current catalogue
Pour prix, voir catalogue en vigueur*

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	8
4 Concept of uncertainty.....	11
4.1 Uncertainty, error and “true value”.....	11
4.2 Statements of uncertainty	12
4.3 Combining uncertainties	13
5 Tolerance	13
6 Humidity and temperature measurement	13
7 Methods for determining climatic test chamber uncertainties	14
7.1 Empty chamber	16
7.2 Typical load.....	16
7.3 Measurement of conditions in the chamber during the test	17
7.4 Conditions to measure.....	17
7.5 Measurements required	18
7.6 Sources of uncertainty.....	19
7.7 Essential contributions of uncertainty	20
8 Estimation of uncertainty components and their combination	24
9 Overall uncertainty of temperature measurement.....	24
9.1 General.....	24
9.2 Further considerations.....	26
10 Overall uncertainty of relative humidity measurement.....	26
10.1 Uncertainty of temperature measurement at each sensor point.....	27
10.2 Uncertainty of the relative humidity measurement.....	27
11 Anomalous data and presentation of results	30
11.1 Average case analysis.....	30
11.2 Worst case analysis	30
Annex A (informative) Measurement data sets – Loaded chamber	32
Bibliography.....	34

Figure 1 – Approaches to calibration method and uncertainty calculation.....	15
Figure 2 – Illustration of the fluctuation of a temperature sensor	23
Table 1 – Combination of temperature uncertainties	24
Table 2 – Combination of temperature uncertainties at each point	27
Table 3 – Combination of humidity uncertainties	28
Table A.1 – Typical temperature measurement data set and it's analysis and refs	32
Table A.2 – Humidity measurements analysis based on Table A.1 temperatures.....	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ENVIRONMENTAL TESTING –**Part 3-11: Supporting documentation and guidance –
Calculation of uncertainty of conditions in climatic test chambers****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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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 60068-3-11 has been prepared by IEC technical committee 104: Environmental conditions, classification and methods of test.

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

FDIS	Report on voting
104/409/FDIS	104/415/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.

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

A list of all parts in the IEC 60068 series, under the general title *Environmental testing* can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site 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.

INTRODUCTION

This part of IEC 60068 provides guidance for analysing uncertainties of temperature and humidity in climatic test chambers. It has been written for technicians, engineers and managers in environmental testing, and for anyone who needs to understand the results of environmental tests.

The performance of climatic test chambers is a key concern in environmental test engineering. To comply with any test specification, the performance of the chamber needs to be characterized to decide whether the generated conditions fall within the specified limits. This characterization can be a difficult task, and the analysis of uncertainties in chamber performance is often surrounded by confusion. This publication is intended to ease that process.

In what follows, the concept of uncertainty of measurement is introduced first and then the significance of tolerance discussed. Aspects of humidity and temperature measurement are considered, followed by methods for determining and combining uncertainties. The cases of both calibrating an empty chamber and of measuring conditions in a loaded chamber are considered. Finally, detailed guidance and worked examples are given for analysing results to give estimates of uncertainty in the measured performance.

ENVIRONMENTAL TESTING –

Part 3-11: Supporting documentation and guidance – Calculation of uncertainty of conditions in climatic test chambers

1 Scope

This part of IEC 60068 demonstrates how to estimate the uncertainty of steady-state temperature and humidity conditions in temperature and humidity chambers. Since this is inextricably linked to the methods of measurement, these are also described.

This standard is equally applicable to all environmental enclosures, including rooms or laboratories. The methods used apply both to temperature chambers and combined temperature and humidity chambers.

This standard is meant to help everyone using climatic test chambers. Those already familiar with uncertainty of measurement will find it useful for guidance on typical sources of uncertainty and how they should be quantified and combined. It is also intended to assist the first-time or occasional user who has little or no knowledge of the subject.

To discuss uncertainty, it is important first to understand what is being measured or characterized. The calibration or characterization of the performance of a chamber is concerned with the humidity and temperature of the air in the chamber, as experienced by the item under test, at a given set point. This should not be confused with characterizing or calibrating the chamber sensor, which is a separate matter.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60068-3-5: *Environmental testing – Part 3-5: Supporting documentation and guidance – Confirmation of the performance of temperature chambers*

IEC 60068-3-6: *Environmental testing – Part 3-6: Supporting documentation and guidance – Confirmation of the performance of temperature/humidity chambers*

ISO 3534-1:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*

ISO 3534-2:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Applied statistics*

International Vocabulary of basic and general standard terms in metrology. ISO, Geneva, Switzerland 1993 (ISBN 92-67-10175-1) – VIM

Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO, Geneva, Switzerland 1993.
(ISBN 92-67-10188-9) – GUM

3 Terms and definitions

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

3.1

calibration authority

laboratory or other organization that performs calibrations and is itself accredited by the appropriate national accreditation body

3.2

climatic test chamber

enclosure

chamber or enclosed space where the internal temperature or temperature and humidity can be controlled within specified limits

3.3

combined standard uncertainty

standard uncertainty of the result of a measurement when that result is obtained from the values of a number of other quantities, equal to the positive square root of a sum of terms, the terms being the variances or covariances of these other quantities weighted according to how the measurement result varies with changes in these quantities

See also GUM.

3.4

correction

value added algebraically to the result of a measurement to compensate determinable systematic error

See also VIM.

3.5

confidence level

value of probability associated with a confidence interval

NOTE The confidence level is the likelihood that the “true value” lies within the stated range of uncertainty usually expressed as a percentage, e.g. 95 %.

See also ISO 3534-1.

3.6

coverage factor

numerical factor to multiply the combined standard uncertainty to obtain an expanded uncertainty

NOTE A coverage factor of $k=2$ corresponds to a confidence level of approximately 95 % if normally distributed and if the number of degrees of freedom is sufficiently large.

See also GUM.

3.7**dew point**

temperature at which the partial pressure of the water vapour is equal to the saturation vapour pressure over water or ice

NOTE The temperature to which the air would have to cool (at constant pressure and constant water vapour content) in order to reach saturation. A state of saturation exists when the air is holding the maximum amount of water vapour possible at the existing temperature and pressure.

3.8**dispersion**

spread of repeated measurements of a quantity

3.9**drift**

change in the indication of a measuring system not related to a change in the quantity being measured

See also VIM.

NOTE The drift since the last calibration can be estimated and a correction applied to measured values.

3.10**error**

difference between result of a measurement and the true value

3.11**expanded uncertainty**

quantity defining an interval about the result of a measurement that may be expected to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measurand

See also VIM.

3.12**fluctuation**

change (from the mean) in the temperature or humidity after stabilization from time to time at a point in space

NOTE It may be measured by standard deviation or maximum deviation.

3.13**gradient**

maximum difference in mean value, after stabilization, at any moment in time between two separate points in the working space

3.14**incident air**

conditioned airstream which flows into the working space

3.15**partial vapour pressure**

contribution of water vapour in a given volume of air at a constant pressure and temperature of the atmosphere

3.16**reference instrument**

previously calibrated instrument used to measure the conditions within the enclosure

3.17

relative humidity

ratio of actual partial vapour pressure to the saturation vapour pressure at any given temperature and pressure, expressed as a percentage (% RH)

3.18

repeatability

closeness of agreement between independent results obtained in the normal and correct operation of the same method on identical test material, in a short space of time, and under the same test conditions (such as the same operator, same apparatus, same laboratory)

3.19

resolution

smallest changes between indications of the chamber controller display that can be meaningfully distinguished

3.20

saturation vapour pressure

when a given volume of air, at a constant temperature, has water vapour present and is incapable of holding more water vapour it is said to be saturated

3.21

stabilization

achievement of the state of temperature/humidity in the chamber when all mean values in the working space are constant and have maintained temperature/humidity within a given tolerance

3.22

standard deviation

measure of the dispersion of a set of measurements

NOTE The standard deviation, s , is the best estimate of sigma (the population standard deviation).

See also GUM and/or VIM.

3.23

standard uncertainty

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

See also GUM.

3.24

tolerance

acceptance limit specified or chosen for a process or product

See also ISO 3534-2.

3.25

traceability

property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons, all having stated uncertainties

NOTE The unbroken chain of comparisons is called a traceability chain.

See also ISO 3534-1 and VIM.

3.26**true value**

value which characterizes a quantity, perfectly defined in the conditions which exist when that quantity is considered

NOTE The true value of a quantity is a theoretical concept and, in general, cannot be known exactly but is estimated by measurement.

See also ISO 3534-1.

3.27**uncertainty**

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

3.28**uncertainty budget**

list of sources of uncertainty compiled with a view to evaluating a combined standard uncertainty associated with a measurement result

3.29**uncertainty contribution**

input to an uncertainty budget

3.30**working space**

part of the chamber in which the specified conditions can be maintained within the specified tolerances

4 Concept of uncertainty**4.1 Uncertainty, error and “true value”**

In every measurement – no matter how careful – there is always a margin of doubt about the result. In simple terms, the uncertainty of a measurement is a quantification of the doubt about the measurement result.

While discussing uncertainty we often also need to consider a related but separate concept, “error”. A measurement “error” is the difference between the measured value and the “true value” of the thing being measured.

The “true value” of any quantity is in principle unknowable. This leads to a problem since the “error” is defined as the result of a measurement minus the “true value”. Sometimes this difference can be estimated. Both terms are best avoided as much as possible and, when necessary, should be used with care. Discussion of “error analysis”, which used to be included in many scientific papers, should have been entitled “analysis of the probable limits of error”, or more properly, “analysis of uncertainty”. In older publications the term “error” was widely used when ‘uncertainty’ would have been the correct term.

Uncertainty is not the same as error. If the conditions in a test chamber are measured with a calibrated instrument and the result is 75 % RH when the chamber controller says 90 % RH, that does not mean the uncertainty is 15 % RH. It is known that the relative humidity is 75 % RH. One is aware that either the controller reading is wrong or the chamber is operating incorrectly. It has an error estimated to be 15 % RH. The uncertainty is a characteristic of the measurement that gave the answer 75 % RH. Could that be wrong and, if so, by how much?

When considering “true value”, uncertainty, and error, one of the most important sources of this type of information for a measuring instrument is its calibration certificate. It is vital to use all of the information provided by the calibration certificate to ensure that the best estimate of the test uncertainties are obtained.

4.2 Statements of uncertainty

4.2.1 General

When reporting the results of a measurement, three numbers are necessary for a metrologically correct and complete statement of the result of each measurement point. For example, the complete statement could be:

The “true value” is: 39,1 °C ± 0,3 K with 95 % confidence:

- 39,1 °C is the best estimate of the true value;
- ±0,3 K is the confidence interval;
- 95 % is the confidence level.

An explanation of these three components follows.

4.2.2 Best estimate of the true value of the measured quantity

Often this will simply be the reading on the calibrated reference instrument which, in the case of a climatic test, could be the temperature measurement system and/or hygrometer reading, or if the chamber has been calibrated it could be the chamber controller display. If the calibration shows either for an instrument or for a chamber controller that an error exists (which is not an uncertainty), this should be used to apply a correction. For example, if the calibration of a thermometer shows that it reads 1 K high, 1 K should be subtracted from the reading to obtain the best estimate of the true value.

4.2.3 Confidence interval

This is the range of measured values within which the “true value” lies with a given level of confidence. In our example this interval is ±0,3 K.

4.2.4 Confidence level

The “confidence level” of a measurement is a number (e.g. 95 %) expressing the degree of confidence in the result. This is the probability that the real “true value” lies in the given range. Most sets of data are normally distributed and about 68 % of the values will fall within plus or minus one standard deviation of the mean. About 95 % of the values can be expected to fall within plus or minus 2 standard deviations (95 % confidence level). Put another way, when many such measurements are performed not more than 1 in 20 will lie outside the stated limits. Hence multiplying the standard deviation by 2 is an accepted way of encompassing 95 % of the range of values. With a 95 % confidence level, we are 95 % sure that the “true value” lies in the stated range.

It is conventional to work at the 95 % confidence level. Higher confidence levels can be used but the confidence interval will increase.

4.2.5 Statement of uncertainty

In the above example the statement of uncertainty is that the temperature was 39,1 °C ± 0,3 K with 95 % confidence. 39,1 °C was the best estimate of the temperature but because of the uncertainties there is a possibility of it being in the range 38,8 °C to 39,4 °C with a confidence of 95 %.

4.3 Combining uncertainties

Uncertainty contributions shall be expressed in similar terms before they are combined. They shall be in the same units and at the same level of confidence. All contributions should be converted into standard uncertainties (i.e. having a confidence level of plus or minus one standard deviation). This is discussed further in Clauses 9 and 10.

5 Tolerance

When a test item is to be conditioned one of the first questions asked is, “Will the chamber achieve and maintain the required conditions?” This is asked since the test specification will often set a tolerance for the required condition e.g. $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\pm 5\text{ \% RH}$. In deciding whether a tolerance is met, the uncertainty in the measured chamber performance shall be taken into account.

Tolerances are not the same as uncertainties. Tolerances are acceptance limits which are chosen for a process or product. Most often the aim of knowing the uncertainty in a chamber’s performance is to decide whether a tolerance is met. In deciding this, the deviation from the required condition, together with the uncertainty, shall be considered. Using the values cited in 4.2.5, it is certain to within 95 % that the true temperature is between $38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $39,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. If the required condition is $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ K}$, then the probability that the true temperature lies within the tolerance is considerably better than 95 % because the entire confidence interval lies within the range of the tolerance.

If the measured humidity is 81,7 % RH, and the confidence interval is $\pm 3,6\text{ \% RH}$ at a 95 % confidence level, then it is certain to within 95 % that the true humidity is between 78,1 % RH and 85,3 % RH. If the required condition is $85 \pm 5\text{ \% RH}$, even though the measured condition is within this range, the probability that the true humidity is within $\pm 5\text{ \% RH}$ of the set point is significantly less at a 95 % confidence level, because the entire confidence interval does not lie within the range of the tolerance. However, from the uncertainty, there are statistical methods for making a good estimate of how likely this is.

6 Humidity and temperature measurement

When taking humidity measurements there are many ways of approaching the situation. It is generally assumed that the water vapour content of the air is uniform throughout the chamber. This is a reasonable assumption, and people who have performed measurements of humidity at multiple points in a chamber can confirm that this is normally the case. However, this does not mean that the relative humidity is uniform.

Dew point, being directly related to vapour pressure, can be assumed to be uniform across the chamber and is not affected by temperature. It may be that during routine tests, humidity measurement is only made in one place. However, at some point, either during the test or when the chamber is operating under similar conditions, humidity measurements shall be made in at least two places so that an uncertainty can be assigned to the assumption that the vapour content of the air is uniform.

For most environmental tests, the required humidity is specified in terms of relative humidity. The importance of relative humidity arises because the behaviour of most organic materials depends on this parameter. Factors such as physical expansion of plastics and wood, biological activity, electrical impedance and corrosion rates are examples of processes that are affected by the relative humidity.

In a chamber the vapour pressure is often nearly uniform.

Even when the air is thoroughly stirred there are often temperature differences from place to place in chambers and, although the water vapour pressure is often nearly uniform, the temperature differences cause differences in the relative humidity. A single humidity measurement at only one location is often sufficient to tell us about the vapour pressure in the rest of the chamber. The single measurement should be made at a central point or on the incident air side of the object under test.

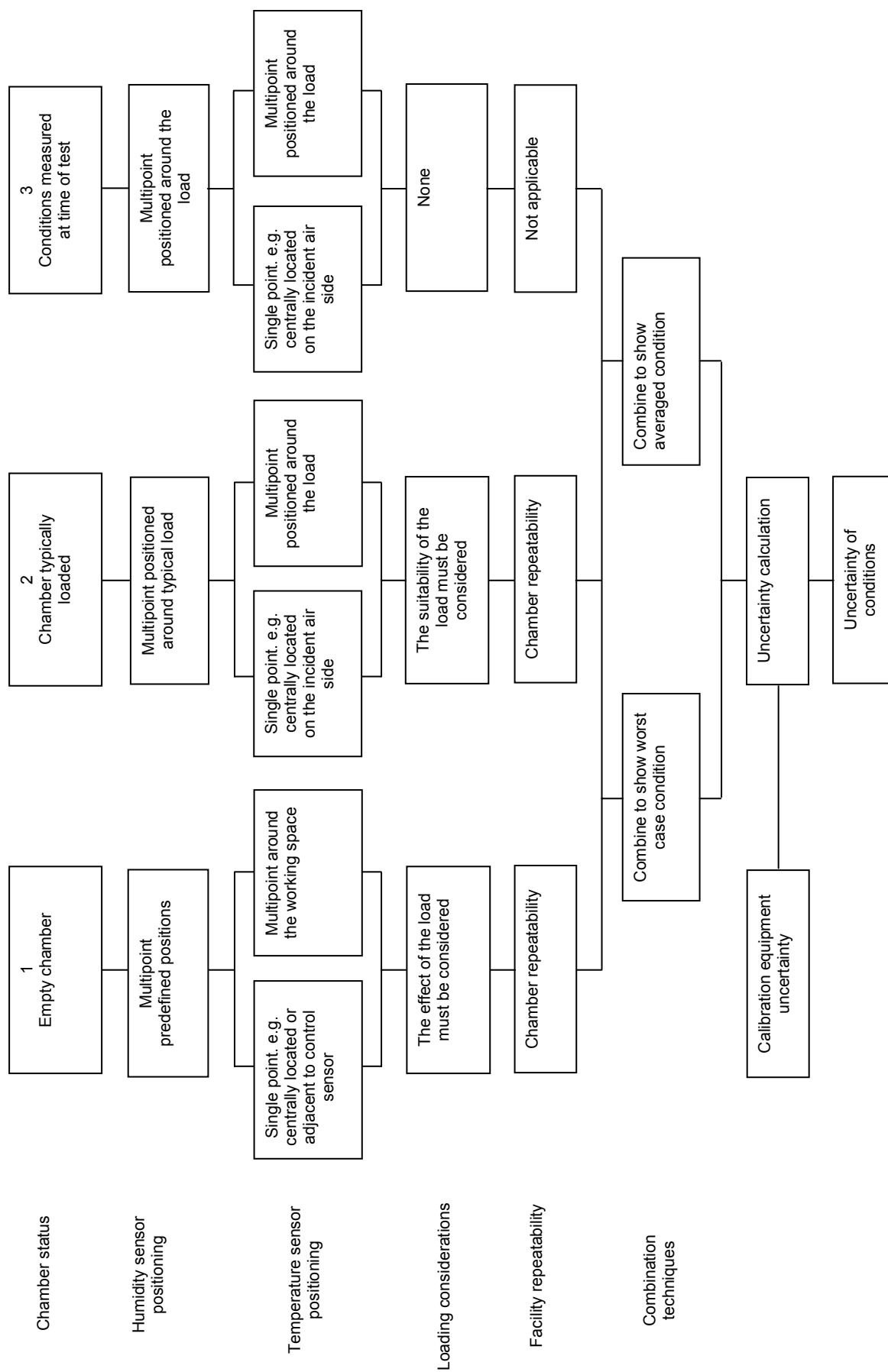
The measurement can be made with any hygrometer, but normally it will be one of three types:

- a dew-point (dp) hygrometer (mirror condensation);
- a psychrometer (wet/dry); or
- a relative humidity probe.

Examples are shown in Annex A.

7 Methods for determining climatic test chamber uncertainties

There are three basic methods for determining conditions in a climatic chamber. These three methods reflect the different requirements in different types of testing and there are good reasons for each approach. These methods are illustrated in Figure 1.



IEC 67007

Figure 1 – Approaches to calibration method and uncertainty calculation

7.1 Empty chamber

7.1.1 Advantages

Advantages are as follows:

- a) The entire working space is calibrated.
- b) Calibration need be carried out only once or twice a year.
- c) Re-calibration is not required when the test sample is changed.
- d) The suitability of the chamber can be assessed without subjecting the test sample to conditioning.
- e) Relatively low cost. Only one set of calibrated instruments required for many chambers.

7.1.2 Disadvantages

Disadvantages include:

- a) The effect of the test sample is difficult to quantify, although it may be negligible for samples that are very small compared with the chamber. It is very difficult to assign an uncertainty to the effect of the load.
- b) The effect of heat-dissipating test samples is very hard to quantify.
- c) Drift, resolution, and repeatability of the chamber controller shall be assessed and their contributions to the uncertainty calculations shall be included.

7.2 Typical load

Calibration of the chamber with a typical load is ideal where very similar tests are repeated.

7.2.1 Advantages

Advantages are as follows:

- a) The affect of the load on the control of the chamber can be accurately assessed without subjecting the test sample to an unknown stress.
- b) The smallest suitable chamber that produces satisfactory conditions can be chosen prior to test.
- c) Careful positioning of the sensors can give detailed information about critical parts of load.
- d) Anomalies from dissipating loads can be quantified.
- e) Relatively low cost. Only one set of calibrated instruments required for many chambers.

7.2.2 Disadvantages

Disadvantages include:

- a) Re-calibration is required when the test sample is changed significantly.
- b) Drift, resolution and repeatability of the chamber controller shall be assessed and their contributions to the uncertainty calculations shall be included.

7.3 Measurement of conditions in the chamber during the test

7.3.1 Advantages

Advantages are as follows:

- a) This method gives the best estimate in the measured value of the conditions experienced by the item under test. It is ideal when different kinds of loads and different tests are being performed.
- b) The effect of the load on the control of the chamber can be accurately assessed.
- c) History of chamber calibration drift need not be assessed.
- d) Careful positioning of the sensors can give detailed information about critical parts of the load.
- e) Anomalies from heat dissipating loads can be quantified.
- f) This method can be economical because the chamber is not calibrated for conditions that are not required.

7.3.2 Disadvantages

Disadvantages include:

- a) Measurement equipment is required for every test.
- b) Uncertainty calculations shall be made for every test.
- c) Can be the most expensive method because measurement equipment is required all the time.

7.4 Conditions to measure

If measurements are made at the time of the test, then an uncertainty can be calculated for that condition. Alternatively, a calibration of the chamber could be performed for each condition for which the chamber is to be used. However, in practice it is not always necessary to perform a calibration at every possible condition.

If measurements are not made at the time of the test, the whole of the measurement sequence and the analysis shall be repeated for a set of conditions that cover at least a range of use. For evaluation an example is given in IEC 60068-3-6.

For temperature only (i.e. humidification OFF) this should include sufficient measurement points to cover:

- the highest temperature;
- the lowest temperature;
- at least two temperatures with the cooling ON;
- at least two temperatures with the heating ON.

In addition to the temperature-only measurements above, measurements should be performed for at least two humidity values, covering the range, for any of the above conditions where humidity tests are to be performed.

It is necessary to perform so many measurements because each of the humidity and temperature control systems can cause the chamber to have different gradients and fluctuations. The temperature control is often much worse when the humidity system is on.

If the chamber is only used at a few specific set points then only these need to be calibrated.

When the test is not performed at one of the calibrated levels, it is necessary to interpolate between two calibrated levels. Interpolation should be used with caution and preferably only if

- the calibrated levels are reasonably close to the test level,
- the services used for each calibrated level (refrigeration, dehumidifiers, heaters, etc.) are the same.

7.5 Measurements required

The measurements required are the same for all the methods; it is simply a matter of when the measurements are made and how the results are analysed.

7.5.1 Temperature

For temperature measurement, an array of temperature sensors is used to measure the temperature at points distributed around the chamber. There are other standards IEC 60068-3-5 that give measurement methods but they do not address the consequences of uncertainty and only refer to empty chambers.

For an empty chamber, eight sensors are normally used at the corners of the working space, and a ninth in the centre. For large chambers more sensors may be required.

For a typical load, or an item under test, eight sensors, one at each corner of the object, are usually used. For very small test items fewer sensors may be sufficient, but at least four should be used. For large or unusually shaped objects, or where some particular point on the test item is of special interest, extra sensors should be employed as appropriate.

For a heat dissipating test item, the measurement of the incident air temperature is usually considered to be the condition of interest for the report but the other sensors should still be used so that the local effects of the heat from the test item can be quantified.

7.5.2 Humidity

For humidity measurement, a hygrometer is positioned centrally on the incident air side of the test item or in the centre of an empty chamber. This can be any kind of hygrometer, but is most likely to be a relative humidity sensor, a psychrometer, or a condensation (chilled mirror) hygrometer. The vapour pressure can be computed from the humidity and temperature measurements. The vapour pressure is assumed to be the same everywhere in the chamber and the relative humidity is computed from this vapour pressure and the temperature at each of the temperature measurement sensors.

For each condition, a measurement of vapour pressure gradients shall be made so that an uncertainty due to this variation can be calculated. This can be done using several hygrometer probes of any type. However, relative humidity probes and psychrometers are also sensitive to temperature so usually the estimate obtained using these instruments will be larger than the true value.

Another method is to sample from several points through tubing routed to a single hygrometer and switched in alternation.

The vapour pressure gradient is normally small and need only be evaluated occasionally.

7.5.3 Recording procedure

To ensure that a valid assessment can be made, at least 5, and preferably 20 or more recordings should be taken from each sensor at each set condition. The recordings should be taken over a sufficient period of time so that several control fluctuations of the chamber can be recorded. A period of 30 min is normally sufficient.

Recordings are taken from the array of sensors after the chamber has stabilized at each set condition.

Measurements should be taken frequently from each sensor throughout the test period. Table A.1 shows a typical data set, together with some of the analysis.

It is essential to ensure that the intervals between the measurements do not coincide with the cycling interval of the chamber.

7.6 Sources of uncertainty

In any measurement, uncertainties arise from four basic sources.

7.6.1 Calibration uncertainties

Calibration uncertainties for the instruments used are listed on the calibration certificate. These are normally at the 95 % confidence level. When interpreting uncertainties stated on a calibration certificate, care shall be taken to consider all aspects of uncertainty mentioned, including instrument resolution and short-term changes noted during calibration, as well as the measurement uncertainty.

7.6.2 Instrument uncertainties

Instrument uncertainties include factors such as the resolution, repeatability and drift of the instruments used. Repeated measurements can guard against gross errors and give improved confidence in the estimated uncertainties.

7.6.3 Uncertainties arising at the time of the measurement

The dominant uncertainties at the time of the measurement usually concern the gradients and fluctuations in the conditions. The measurement method shall identify these gradients and fluctuations.

7.6.4 Uncertainty by radiation

Radiation effects can be large in some chambers. If the temperature sensors give measurements which are unexpectedly large or vary from test to test or if there is any reason to suspect that radiation could be a problem (e.g. if the temperature of any part of the chamber which can be sensed by the test item is significantly different from the set temperature), then an extra test should be performed with temperature sensors which have different radiation colours (e.g. a shiny one next to a black one). For temperatures above +100 °C, the radiation effect has more and more influence on the measuring sensor and the specimen.

7.6.5 Additional uncertainties

Any other factor which may affect the measurement, for example, differences between the conditions under which calibration takes place and those in which they are used, shall be taken into account.

Imported calibrations may not be fully relevant to the conditions of use. For example, most calibration authorities calibrate temperature sensors in baths of oil, salt or solvent. The tips of the sensors are immersed, leaving the cables exposed to room temperature, whereas in use both the sensors and cables may be immersed in the chamber environment. Consequently, at calibration there is a heat conduction effect which is not there in use. This effect shall be considered and the magnitude of the effect evaluated, or estimated if this is not possible. The uncertainty in the evaluated (estimated) correction should then be included in the uncertainty budget.

7.7 Essential contributions of uncertainty

The following covers the most important sources of uncertainty but is not exhaustive. Creating a list of sources of uncertainty is the first step in any uncertainty analysis. The list should identify all sources of uncertainty, however some of them may be thought to be insignificant.

7.7.1 Reference instrument calibration uncertainty

This is the uncertainty stated on the calibration certificate, not to be confused with the “error” or “correction” stated on the certificate. Several reference measurements may be involved with the calibration uncertainty of each contributing to the overall measurement uncertainty.

7.7.2 Reference instrument drift

Most instruments change slowly with time. Conditions of use may affect the rate of change and with some instruments the effect can be significant. Data from successive calibrations are essential to estimate the limits of drift in use, but initially manufacturer’s data may be used for an estimate. However, generally manufacturers quote drift under ideal conditions so usually a larger figure should be used. The drift of all instruments used shall be considered.

7.7.3 Resolution

This refers to the resolution of the reference instruments used for measuring the conditions in the chamber. The resolution of the chamber controller shall be included in the uncertainty analysis but should be omitted if the measurements are made at the time of the test.

7.7.4 Temperature effects

Temperature coefficients can be very significant in some instruments. Instruments being operated near a climatic test chamber are often subjected to ambient temperature variations. Generally, even when temperature is kept nominally constant, temperature effects are worth careful evaluation because corrections can then often be applied. However, some uncertainty remains even after corrections have been applied.

7.7.5 Hysteresis

Hysteresis is the difference between the output of an instrument for a rising condition and the output for a falling condition. Hysteresis can be large for certain types of relative humidity probe and for some types of temperature sensor.

7.7.6 Measurement repeatability

Repeatability is the closeness of the agreement between repeated measurements of the same property under the same conditions.

7.7.7 Fluctuations

Fluctuations are changes in the condition being measured occurring over a period of time. They are present in most measurement situations. In environmental testing they are usually one of the largest contributions to the overall uncertainty.

Humidity fluctuations occur for two main reasons. The vapour content of the air (the vapour pressure or dew point) may fluctuate. In addition, the fluctuations in temperature cause fluctuations in relative humidity, even when the vapour content is relatively stable. Both factors shall be considered and included in the uncertainty analysis.

Temperature and humidity sensors can respond at different rates and do not necessarily show what is really happening in a chamber. To determine the extent of fluctuations many measurements shall be taken with fast-responding instruments. Often chamber conditions cycle in a regular pattern about the set point and if measurements are taken at the same point in each cycle (for example, always at the maximum of each cycle) the result will be misleading. This is called 'aliasing' and care shall be taken to detect and avoid this; for example, by sampling at least four times faster than the chamber cycle or by sampling at random intervals.

The effect of fluctuations on the calculation of the mean may be reduced by taking a number of readings and calculating the uncertainty of the mean. The improvement in the result is a function of the square root of the number of readings and 20 readings will normally be sufficient.

A fast responding (small) sensor will capture the peaks and troughs of the cyclic control of an climatic chamber. A slow responding (large) sensor may also show the cyclic nature of the control, but the recorded peaks and troughs may be compressed due to the slow response of the sensor. Consequently, an uncertainty component may have to be included to account for the inability of the sensor to detect the peak temperatures.

Temperature fluctuations are illustrated in Figure 2 (below).

7.7.8 Gradients

Gradients are the variations of the measured quantity from place to place. In most environmental tests, temperature gradients are the largest single source of uncertainty. To estimate the size of temperature gradients, measurements shall be taken from different regions around the item under test or around the chamber working space when calibrating an empty chamber.

Gradients in the vapour content of the chamber air are usually comparatively small although this may not be true when there is condensation anywhere in the chamber. However, as with fluctuations, gradients in temperature cause a gradient in the relative humidity even when the vapour content is comparatively constant.

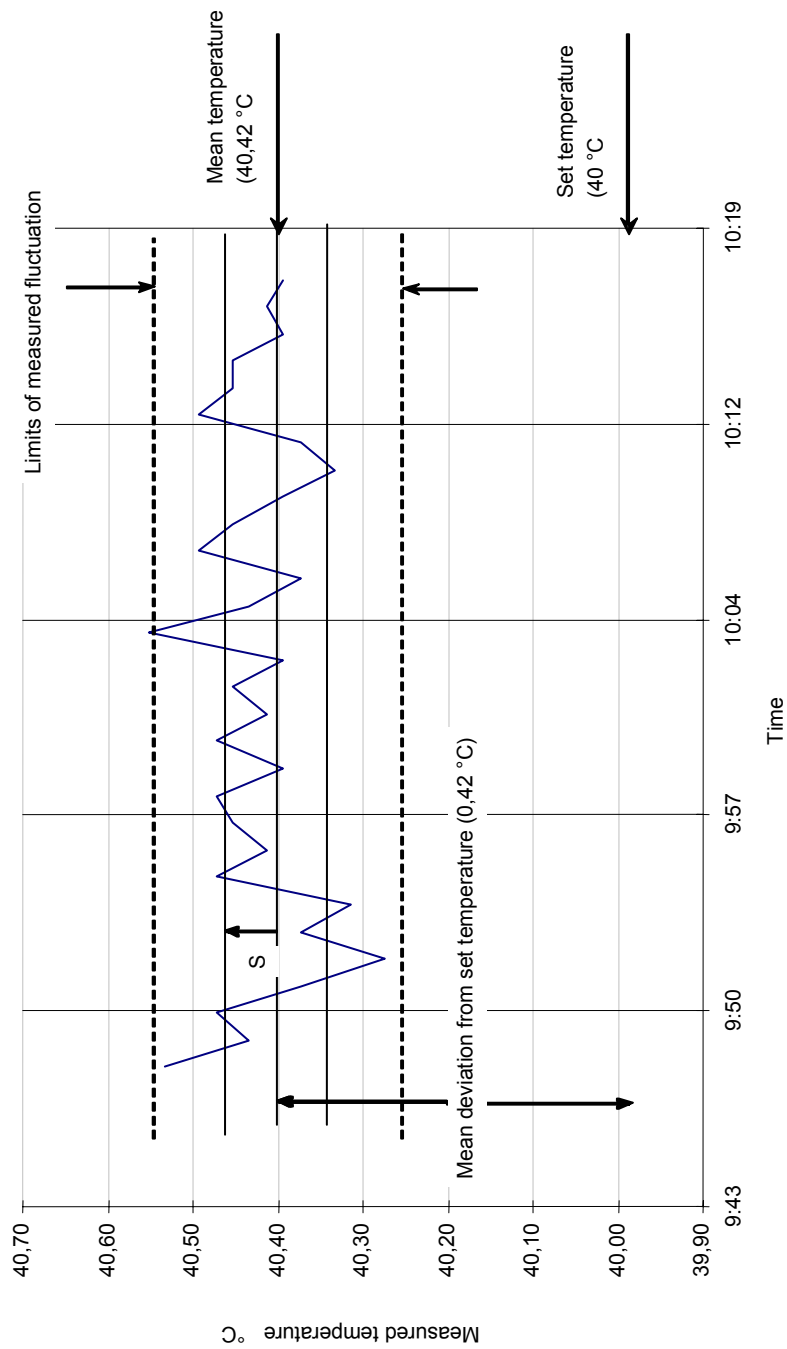
7.7.9 Additional uncertainties when calibrating an empty chamber or a chamber with a typical load

These can include:

- drift of chamber instruments;
- repeatability of chamber instruments;
- resolution of chamber instruments.

A major consideration is the effect of the test sample on chamber conditions. Unless the size of the test sample is insignificant compared to the chamber working space, then consideration should be given to using one of the other methods to establish an uncertainty contribution.

Particular consideration should be given to heat-dissipating loads.



IEC 671/07

Figure 2 – Illustration of the fluctuation of a temperature sensor

8 Estimation of uncertainty components and their combination

The evaluation and combination of all the uncertainties present in a measurement is most conveniently done using a spreadsheet. The following is a typical example based on evaluation of the overall uncertainty of temperature measurement as presented in Clause 9.

The table includes examples from different types of uncertainty source such as calibration uncertainties from certificates, uncertainties from random effects in sets of repeated measurements, and systematic uncertainties such as biases and drifts which are estimated or calculated.

The evaluation of the overall uncertainty of a measurement or calibration is a three-step process:

- Each uncertainty source shall be identified, quantified and represented as a standard uncertainty.
- The combined effect of the individual components is found as the square root of the sum of their squares. This is known as the combined standard uncertainty.
- This, in turn, is then multiplied by a coverage factor of $k = 2$ to give the expanded uncertainty, which may be interpreted as a confidence interval that will include the true value of the measured quantity with a probability of 95 %.

The process of identifying and quantifying the sources of uncertainty that are included in this analysis are discussed in Clause 9 for temperature chambers, and in Clause 10 for combined temperature and humidity chambers.

9 Overall uncertainty of temperature measurement

9.1 General

Table 1 below illustrates the method of combining uncertainties using the data sets in Table A.1. Each uncertainty source is described in detail in the text following Table 1. This method can be used for temperature chambers and is also used for combined temperature and humidity chambers.

Table 1 – Combination of temperature uncertainties

	Uncertainty source	Value °C	Distribution	Divisor	Standard uncertainty	Squared
Reference instrument	Calibration	0,100	Normal	2,00	0,050	0,002 500
	Repeatability	0,010	Normal	1,00	0,010	0,000 100
	Hysteresis	0,010	Rectangular	1,73	0,006	0,000 033
	Temperature effects	0,010	Rectangular	1,73	0,006	0,000 033
	Drift	0,100	Rectangular	1,73	0,058	0,003 333
	Linearity	0,020	Rectangular	1,73	0,012	0,000 133
	Resolution	0,010	Rectangular	1,73	0,006	0,000 033
Chamber	Temperature	0,469	Normal	1,00	0,469	0,219 961
	Gradient					
	Temperature fluctuations	0,061	Normal	1,00	0,061	0,003 721
	Overall mean	0,026	Normal	1,00	0,026	0,000 676

Sum of squares	0,230 525
Combined standard uncertainty	$\pm 0,480$ K
Expanded uncertainty at 95 % confidence	$\pm 0,96$ K

The reference instrument calibration uncertainty, $\pm 0,1$ K, is the uncertainty stated on the calibration certificate of the thermometers. Calibration uncertainty can be assumed to be a normal distribution because it is the sum of many components from the calibration chain. The uncertainty is quoted at the 95 % confidence level so that the divisor 2 is needed to obtain the standard uncertainty.

Repeatability should be measured by a prior experiment if possible. If the value is calculated from a set of repeat measurements, in this case $\pm 0,01$ K, the repeatability of the set of readings will form a normal distribution characterized by a mean value and an estimated standard deviation. The standard uncertainty is equal to the standard deviation (i.e. the divisor has a value of 1). Alternatively, the value may be taken from the thermometer manufacturer's specification and treated as a rectangular probability distribution as described in the next paragraph.

Hysteresis is the difference between the output for rising and falling temperatures. The value of $\pm 0,01$ K, is taken from a calibration certificate. The first time the thermometers are calibrated, rising and falling measurements are requested in the mid range to determine this value. A rectangular distribution is assumed and the limits are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

Temperature effects arise from the temperature coefficient of the temperature measuring instrument electronics and the temperature variations they experiences during use. From the manufacturer's specification (0,001 K/K) and the conditions of operation (20 ± 10) °C it is calculated that the effect cannot exceed $\pm 0,01$ K. There is no way of knowing how likely it is to be operating at the centre or at the limits of this range, so it is assumed to be a rectangular probability distribution. The (equivalent) standard deviation is obtained from the rectangular distribution's limits by dividing by the square root of 3. The standard uncertainty is equal to the standard deviation (the divisor has an overall value of square root of 3).

Drift of the reference instrument can be estimated by comparing the current and previous calibration certificates. In the case cited above a change of 0,1 K had occurred between calibrations. It is assumed that any subsequent change could be in either direction and of the same magnitude. A rectangular distribution is assumed and the limits are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

Non -linearity is the magnitude of deviation of the sensor or instrument output from a straight line calculated with a linear regression method. It is assumed that the deviation could be in either direction and equally probable within the established non-linearity value. Therefore, a rectangular distribution should be assumed with a value of $\pm 0,02$ K and the limits are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

The resolution, 0,01 K in this case, is an uncertainty associated with digital displays. It is not possible to tell whether the display is just about to change up or down to the next digit simply by observation. The true reading is equally likely between the upper and lower limits and so a rectangular distribution is assumed and then the limits are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty. With some instruments it can be argued that half of this figure can be taken (i.e. $\pm 0,005$ K).

The temperature gradient can be derived from the data in Table A.1. At each measurement, the average and standard deviation of the eight sensors has been calculated. The standard deviation is a measure of the temperature gradients. The safest assumption is to take the largest value of standard deviation, namely $\pm 0,469$ K. The input to the uncertainty budget is a standard deviation from repeated measurements and so can be assumed to be normal and the divisor is 1. If there is a large variation between the standard deviations it may be appropriate to take the largest difference and treat the range obtained as a rectangular distribution.

Fluctuations are also derived from the data in Table A.1. For each sensor the average and standard deviation over the period of the test has been calculated. The standard deviation is a measure of the fluctuations. The safest assumption is to take the largest value of standard deviation, namely $\pm 0,061$ K. Again, it is a standard deviation so it can be assumed to be normal and the divisor is 1. As with gradients, if there is a large variation between the standard deviations it may be appropriate to take the largest difference and treat the range obtained as a rectangular distribution.

Finally, the overall mean of all measurement data in Table A.1, $39,8^{\circ}\text{C}$, is statistically based and an allowance shall be made for the possibility that it may not represent the true average. The value input into the uncertainty budget, $0,026$ K, is actually the overall standard deviation given in Table A.1, $\pm 0,397$ K, divided by the square root of the number of measurements, (240). This component, referred to as the “standard deviation of the mean”, may appear negligible but is included for completeness. If only a few measurements were made, it could become significant.

The result of this analysis for measurements taken with calibrated reference equipment during the test is that the following statement can be made:

The mean temperature in this example was $39,8 \pm 0,96^{\circ}\text{C}$ at a level of confidence of 95 %.

When performing an uncertainty analysis there are always assumptions to be made, as indicated in the previous clauses, and these should always be clearly stated. In general, small residual errors in these assumptions will not make a significant difference to the result, unless they concern one of the two or three largest uncertainty components.

9.2 Further considerations

If the above example relates to measurements made at the time of test, the uncertainty in the temperature is $\pm 0,96$ K.

If the measurements are made with a typical load, then it is also necessary to take into account the chamber resolution and the chamber drift. These need to be combined (by summing in quadrature) with the measurement uncertainty to obtain the overall uncertainty of the conditions experienced by the item under test.

If the measurements are made during calibration of an empty chamber, a further addition to the extra uncertainty contributions mentioned above is required to take account for the possible effect of the load.

10 Overall uncertainty of relative humidity measurement

Before evaluating the uncertainty in the measurement of relative humidity at the time of measurement, it is necessary to evaluate the uncertainty in the measured temperature at the sensor points, as these temperatures are used in the calculation of relative humidity at those points.

10.1 Uncertainty of temperature measurement at each sensor point

Table 2 covers the evaluation of the temperature uncertainty at points in the chamber which will then be included in the evaluation of the humidity uncertainty at those points. The uncertainty components involved and the analysis are very similar to those in the example given in Clause 9, except that the uncertainty contributions for the effect of gradients and the uncertainty in the overall mean are omitted. The combination of the standard uncertainties is most conveniently carried out using a spreadsheet.

Table 2 – Combination of temperature uncertainties at each point

	Uncertainty source	Value K	Distribution	Divisor	Standard uncertainty	Squared
Reference instrument	Calibration	0,100	Normal	2,00	0,050	0,002 500
	Repeatability	0,010	Normal	1,00	0,010	0,000 100
	Hysteresis	0,010	Rectangular	1,73	0,006	0,000 033
	Temperature effects	0,010	Rectangular	1,73	0,006	0,000 033
	Drift	0,100	Rectangular	1,73	0,058	0,003 333
	Linearity	0,020	Rectangular	1,73	0,012	0,000 133
	Resolution	0,010	Rectangular	1,73	0,006	0,000 033
	Chamber temperature fluctuations	0,061	Normal	1,00	0,061	0,003 721

Sum of squares 0,009 853

Combined standard uncertainty $\pm 0,099$ K

Expanded uncertainty at 95 % confidence $\pm 0,20$ K

10.2 Uncertainty of the relative humidity measurement

In this example, each relative humidity in Table A.2 has been calculated from the dew point (left hand column of Table A.2) using a single humidity sensor and the temperature of the corresponding individual temperature sensor in Table A.1.

This analysis considers the uncertainty budget for relative humidity measurement. Generally the assumptions made in identifying the uncertainty sources and the way the uncertainty figures are obtained is similar to the first example, but there is one important difference; many of the values included in the uncertainty budget come from uncertainties in temperature or dew point. All of the uncertainty values and standard uncertainties shall be converted into relative humidity units before they can be combined.

In our example, the conditions are nominally 40 °C and 85 % RH. At these conditions a change in temperature of $\pm 0,1$ K corresponds to a change of $\pm 0,45$ % RH. A change in dew point temperature of $\pm 0,1$ K has almost the same effect. So, to change from an uncertainty in terms of dew point or temperature to an uncertainty in terms of relative humidity, it is necessary to multiply by 4,5 %/K. This factor is sometimes called the sensitivity and should be calculated for each condition.

To calculate the sensitivity, calculate the relative humidity from the dew point and temperature and then repeat the calculation changing the dew point or temperature by 0,1 K. The result will give the sensitivity.

Table 3 – Combination of humidity uncertainties

	Uncertainty source	Value % RH	Distribution	Divisor	Standard uncertainty	Squared
Reference instrument	Instrument calibration	0,900	Normal	2,00	0,450	0,202 500
	Repeatability	0,225	Normal	1,00	0,225	0,050 625
	Hysteresis	0,045	Rectangular	1,73	0,026	0,000 675
	Temperature effect	0,225	Rectangular	1,73	0,130	0,016 900
	Hygrometer drift	0,450	Rectangular	1,73	0,260	0,067 600
	Linearity	0,225	Rectangular	1,73	0,130	0,016 900
	Resolution of hygrometer	0,450	Rectangular	1,73	0,260	0,067 600
Chamber	Humidity fluctuations	0,755	Normal	1,00	0,755	0,570 025
	Humidity gradients due to temperature	2,130	Normal	1,00	2,130	4,536 900
	Vapour pressure gradient	0,900	Rectangular	1,73	0,520	0,270 400
	Temperature uncertainty effect on humidity	0,896	Normal	2,00	0,448	0,200 704
	Overall mean	0,124	Normal	1,00	0,124	0,015 376

Sum of squares 6,016 205

Combined standard uncertainty $\pm 2,453$ % RH

Expanded uncertainty at 95 % confidence $\pm 4,9$ % RH

The reference instrument calibration uncertainty, $\pm 0,2$ K dew point temperature, is the uncertainty stated on the calibration certificate of the hygrometer. It is multiplied by the sensitivity factor (4,5) to convert it to a relative humidity of 0,900 % RH. Calibration uncertainty can be assumed to be a normal distribution because it is the sum of many components from the calibration chain at 95 % confidence level. The divisor is 2 to obtain one standard uncertainty.

Repeatability should be measured by a prior experiment if possible. If the value is calculated from a set of repeat measurements, in this case $\pm 0,05$ K dew point temperature, the repeatability will be normal and it is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity. The divisor is 1 to obtain one standard uncertainty. Alternatively, the value may be taken from the instrument manufacturer's specification and treated as a rectangular distribution.

Hysteresis is normally negligible for condensation hygrometers, but for relative humidity probes it can be several per cent. It is determined by specifying rising and falling measurements at the mid range point during the first calibration. In this case the calibration shows no significant hysteresis but $\pm 0,01$ K dew point temperature has been assumed as a precaution. It is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity and it is assumed to be a rectangular distribution and so is divided by the square root of 3 to give one standard uncertainty.

Temperature effect is the temperature coefficient of the hygrometer electronics. From the manufacturer's specification (0,005 K dew point temperature/K), and the temperature variations it experiences during use (20 ± 10) °C, it is calculated that the effect cannot exceed $\pm 0,05$ K dew point temperature. It is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity, and it is assumed to be a rectangular distribution, with the limits divided by the square root of 3 to give one standard uncertainty.

The drift of the reference hygrometer is estimated by comparing the current and previous calibration certificates. In this case a change of 0,1 K dew point temperature had occurred between calibrations. It is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity and is assumed to be a rectangular distribution. The limits of the distribution are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

Linearity is estimated by looking at the calibration certificate data of the hygrometer in the same way as the thermal sensor. The non-linearity of $\pm 0,05$ K dew point temperature is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity. It is assumed to be a rectangular distribution and so is divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

The resolution of the hygrometer is $\pm 0,1$ K dew point temperature. It is multiplied by 4,5 and a rectangular distribution is assumed. The limits of the distribution are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

Each relative humidity value in Table A.2 is calculated from the dew point in the second column and the corresponding temperature measurement in Table A.1 so the relative humidity values include the effect of temperature.

Relative humidity fluctuations are derived from the data in Table A.2 in the same way as for temperature. For each temperature sensor, the average and standard deviation of the relative humidity over the period of the test has been calculated. The safest assumption is to take the largest value of standard deviation, $\pm 0,755$ % RH. It is a standard deviation so it can be assumed to be normal and the divisor is 1 for one standard uncertainty.

The humidity gradients are also derived from the results in Table A.2. As in Table A.1, the average and standard deviation of the relative humidity at each of the eight temperature sensors has been calculated at each measurement time. The safest assumption is to take the largest value of standard deviation, $\pm 2,130$ % RH. It is a standard deviation so it can be assumed to be normal and the divisor is 1 for one standard uncertainty.

The vapour pressure gradient may be measured by sampling from different points in the chamber and measuring the dew point of the sample. Measuring vapour pressure gradients may also be done with several relative humidity sensors, but if it is done like that the results are more uncertain (and usually larger) because of the effects of temperature variations, and probe calibration uncertainties. The test showed that the gradient was less than $\pm 0,2$ K dew point temperature. It is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity and is assumed to be a rectangular distribution. The limits of the distribution are divided by the square root of 3 to obtain the standard uncertainty.

The temperature measurement uncertainty at each point also contributes to the uncertainty in relative humidity. This value is available from the prior calculation (Table A.2), as evaluated above. The expanded uncertainty, $\pm 0,20$ K, is multiplied by 4,5 to convert it to relative humidity and is assumed to be a normal distribution. The value of the combined standard uncertainty is given in Table 3.

Finally, the overall mean of all the measurements, 84,9 % RH, is based on a statistical analysis of all the measurements and an allowance shall be made for the possibility that it may not represent the true average. The value, which appears as 0,124, is the overall standard deviation, $\pm 1,924$ % RH, divided by the square root of the number of measurements, (240), to give the standard uncertainty.

The result of this analysis for measurements taken with calibrated reference equipment during the test is that we can make the following statement:

The average humidity experienced by the item under test was $84,9 \pm 4,9$ % RH with 95 % confidence.

If the measurements were performed to calibrate a chamber, with or without a load, additional uncertainties would have to be included, as mentioned in 8.1.

11 Anomalous data and presentation of results

There are two approaches to calculate the uncertainty in the measurement of the conditions achieved within a chamber. The first is to base the calculation on the average conditions within the chamber and the second is to base the calculation on the worst condition. The choice of approach depends on the type of equipment being tested and the requirements of the customer.

11.1 Average case analysis

The average case analysis leads to a statement of the form: the measured condition during the test was condition $\pm$ uncertainty with 95 % confidence. For example, $39,8\text{ °C} \pm 0,96\text{ K}$ with 95 % confidence. In this case the condition is the average measured condition, and it may or may not be what was required by the test.

The ‘average case’ approach indicates what the actual condition was as accurately as possible as well as giving an uncertainty. In humidity tests it will often show that the test fails to meet typical specifications, but will at least indicate what did happen and with what uncertainty.

11.2 Worst case analysis

The data should always be inspected for anomalies. If, on inspection, it is found that one particular sensor’s output or the average output over a short period was more than three standard deviations from the average, it might be appropriate to make a statement about the worst case sensor.

The ‘worst case’ analysis uses only data from the sensor with the largest mean deviation from the set point. The largest mean deviation of this sensor is added to twice the standard deviation of its fluctuations, plus the combined expanded uncertainty of all other uncertainties. This leads to a statement of the form: no point on the item under test was outside the range set-point $\pm$ uncertainty with 95 % confidence. In this example, using data from Tables A.1 and A.2, this gives $40,0\text{ °C} \pm 1,08\text{ K}$ with 95 % confidence. For temperature, it is often possible to use this type of analysis to state that the test was within the required tolerance, e.g. $40,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ K}$, with 95 % confidence. For humidity it would rarely be possible to make this type of statement.

Whichever approach is used, the data required is the same and the process of developing the uncertainty budget can be a very useful indicator of the major sources of uncertainty. It may show that the temperature gradients in test chambers and the cyclical control that often occurs are the main sources of uncertainty. For humidity, the temperature gradients can cause very large changes in the relative humidity from place to place within the chamber. Near saturation at 20 °C, a 1 °C temperature difference causes a 6 % difference in relative humidity. Indeed this one uncertainty is often so large that the others could be ignored.

Annex A (informative)

Measurement data sets – Loaded chamber

Table A.1 – Typical temperature measurement data set and it's analysis and references

Time	Temperature sensor measurements °C								At each measurement	
	1	2	3	4	5	6	7	8	Average	SD
09:48	39,15	39,90	39,62	40,06	39,36	40,31	40,53	39,68	39,825	0,469
09:49	39,13	39,86	39,60	39,98	39,30	40,21	40,43	39,66	39,771	0,441
09:50	39,13	39,86	39,56	40,00	39,28	40,23	40,47	39,66	39,773	0,460
09:51	39,13	39,84	39,58	39,96	39,28	40,19	40,37	39,64	39,748	0,429
09:52	39,05	39,74	39,50	39,86	39,20	40,10	40,27	39,60	39,664	0,419
09:53	39,19	39,86	39,64	40,02	39,36	40,23	40,37	39,66	39,790	0,411
09:54	39,15	39,82	39,62	39,96	39,32	40,17	40,31	39,66	39,751	0,400
09:55	39,17	39,86	39,62	40,02	39,32	40,25	40,47	39,68	39,798	0,445
09:56	39,13	39,80	39,56	39,94	39,28	40,19	40,41	39,66	39,746	0,436
09:57	39,17	39,82	39,58	39,94	39,28	40,21	40,45	39,68	39,766	0,438
09:58	39,19	39,82	39,58	39,98	39,32	40,23	40,47	39,70	39,786	0,437
09:59	39,15	39,84	39,62	39,98	39,32	40,21	40,39	39,70	39,776	0,423
10:00	39,17	39,86	39,64	40,00	39,36	40,25	40,47	39,72	39,808	0,436
10:01	39,17	39,86	39,64	40,00	39,36	40,23	40,41	39,72	39,798	0,420
10:02	39,19	39,86	39,62	39,98	39,36	40,23	40,45	39,74	39,803	0,424
10:03	39,19	39,86	39,62	40,00	39,36	40,21	40,39	39,74	39,795	0,409
10:04	39,28	39,94	39,70	40,12	39,44	40,35	40,55	39,80	39,897	0,434
10:05	39,24	39,86	39,66	39,98	39,38	40,21	40,43	39,76	39,815	0,398
10:06	39,23	39,86	39,66	40,00	39,36	40,17	40,37	39,74	39,798	0,389
10:07	39,28	39,94	39,70	40,08	39,42	40,29	40,49	39,78	39,872	0,414
10:08	39,28	39,92	39,68	40,04	39,38	40,25	40,45	39,78	39,848	0,404
10:09	39,21	39,86	39,62	39,96	39,34	40,17	40,39	39,72	39,783	0,400
10:10	39,13	39,78	39,58	39,86	39,28	40,10	40,33	39,70	39,718	0,397
10:11	39,19	39,82	39,62	39,94	39,32	40,17	40,37	39,72	39,768	0,401
10:12	39,21	39,88	39,66	40,04	39,38	40,25	40,49	39,76	39,833	0,429
10:13	39,19	39,86	39,64	40,00	39,36	40,21	40,45	39,78	39,810	0,420
10:14	39,21	39,88	39,66	40,02	39,38	40,23	40,45	39,78	39,825	0,416
10:15	39,19	39,86	39,64	39,98	39,38	40,19	40,39	39,76	39,798	0,401
10:16	39,19	39,86	39,66	40,00	39,38	40,21	40,41	39,76	39,808	0,408
10:17	39,21	39,86	39,66	40,02	39,38	40,21	40,39	39,78	39,813	0,400
For each sensor										
Mean	39,180	39,852	39,623	39,987	39,342	40,219	40,424	39,715		
SDs	0,052	0,041	0,044	0,053	0,049	0,052	0,061	0,051		
							Overall mean		39,793	
							Overall SD		0,397	

Table A.2 – Humidity measurements analysis based on Table A.1 temperatures

Time	Measured Dew point	Calculated % RH at each temperature sensors								At each measurement	
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average	SD
09:48	36,85	88,32	84,84	86,11	84,13	87,31	82,98	82,02	85,84	85,192	2,130
09:49	36,74	87,89	84,51	85,69	83,98	87,06	82,92	81,96	85,41	84,927	2,002
09:50	36,73	87,84	84,47	85,82	83,84	87,11	82,78	81,74	85,37	84,871	2,081
09:51	36,62	87,31	84,05	85,22	83,52	86,59	82,46	81,68	84,95	84,471	1,936
09:52	36,63	87,73	84,54	85,63	84,01	87,00	82,95	82,16	85,17	84,898	1,901
09:53	36,72	87,51	84,42	85,41	83,71	86,69	82,74	82,13	85,32	84,741	1,861
09:54	37,02	89,14	85,99	86,91	85,36	88,31	84,37	83,75	86,73	86,321	1,847
09:55	36,60	87,03	83,87	84,94	83,16	86,31	82,11	81,16	84,67	84,157	2,000
09:56	36,63	87,36	84,27	85,35	83,65	86,63	82,51	81,55	84,90	84,529	1,965
09:57	36,85	88,23	85,20	86,29	84,66	87,68	83,42	82,37	85,84	85,460	1,996
09:58	36,98	88,76	85,81	86,91	85,08	88,12	83,92	82,86	86,36	85,977	2,003
09:59	36,63	87,27	84,09	85,08	83,47	86,45	82,42	81,64	84,72	84,394	1,907
10:00	36,83	88,13	84,93	85,93	84,30	87,21	83,15	82,19	85,56	85,175	1,980
10:01	36,59	86,98	83,82	84,81	83,20	86,08	82,15	81,38	84,45	84,108	1,887
10:02	36,64	87,13	84,05	85,13	83,52	86,31	82,38	81,43	84,59	84,317	1,906
10:03	36,84	88,08	84,97	86,06	84,35	87,26	83,37	82,58	85,52	85,275	1,865
10:04	36,60	86,48	83,51	84,58	82,72	85,76	81,68	80,82	84,14	83,711	1,937
10:05	36,85	87,85	85,02	85,93	84,48	87,22	83,42	82,45	85,47	85,230	1,811
10:06	37,02	88,76	85,81	86,73	85,18	88,12	84,37	83,48	86,36	86,103	1,789
10:07	36,57	86,33	83,38	84,44	82,76	85,71	81,80	80,94	84,09	83,683	1,846
10:08	36,60	86,48	83,60	84,67	83,07	86,03	82,11	81,25	84,22	83,930	1,808
10:09	36,59	86,80	83,82	84,90	83,38	86,17	82,41	81,46	84,45	84,173	1,799
10:10	36,84	88,37	85,34	86,25	84,97	87,63	83,90	82,84	85,70	85,625	1,819
10:11	36,74	87,60	84,69	85,59	84,15	86,97	83,09	82,22	85,14	84,934	1,820
10:12	36,67	87,18	84,10	85,09	83,39	86,36	82,43	81,39	84,64	84,321	1,932
10:13	36,62	87,03	83,96	84,95	83,34	86,22	82,38	81,34	84,32	84,191	1,889
10:14	36,84	87,99	84,88	85,88	84,26	87,17	83,28	82,32	85,34	85,140	1,892
10:15	37,00	88,86	85,72	86,73	85,18	87,93	84,19	83,31	86,18	86,010	1,842
10:16	36,77	87,75	84,65	85,55	84,03	86,84	83,05	82,18	85,10	84,893	1,850
10:17	36,95	88,52	85,49	86,40	84,76	87,69	83,87	83,08	85,85	85,708	1,835
For each sensor											
Mean		87,690	84,594	85,632	83,987	86,931	82,954	82,056	85,212		
SDs		0,746	0,731	0,707	0,739	0,718	0,744	0,755	0,706		
Overall mean										84,88	
Overall SD										1,924	

Bibliography

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. ISBN 92-67-10188-9, First Edition 1993, corrected and reprinted 1995 (BSI Equivalent: BSI PD 6461: 1995, Vocabulary of Metrology, Part 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement BSI ISBN 0 580 23482 7).

BS 1339-1:2002 Humidity – Part 1: Terms, definitions and formulae.

BS 4833:1986 Schedule for Hygrometric tables for use in the testing and operation of environmental enclosures

EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, December 1999, European co-operation for Accreditation of Laboratories, Rotterdam

EA-4/02-S1 Supplement to EA-4/02

Measurement Good Practice Guide No 11, A Beginner's Guide to Uncertainty of measurement, Stephanie Bell, NPL, London, 1999

Measurement Good Practice Guide No 36, Estimating Uncertainties in Testing, Keith Birch, NPL, London, 2001

NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results"

Pragnell R F, An Excel spreadsheet containing the commonly required hygrometric formulae may be downloaded from the SEE web site. www.environmental.org.uk

Pragnell R F, The relationship between humidity calibration standards and standards for environmental testing, Environmental Engineering, September 1988

UKAS publication M 3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement Edition 1, December 1997

UKAS publication Lab12 The Expression of Uncertainty in Testing, October 2000

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	38
INTRODUCTION	40
1 Domaine d'application	41
2 Références normatives	41
3 Termes et définitions	42
4 Notion d'incertitude	45
4.1 Incertitude, erreur et « valeur vraie »	45
4.2 Dispositions sur l'incertitude	46
4.3 Incertitudes composées	47
5 Tolérance	47
6 Mesure de l'humidité et de la température	47
7 Méthodes pour déterminer les incertitudes des chambres d'essais climatiques	48
7.1 Chambre d'essais vide	50
7.2 Charge type	50
7.3 Mesure des conditions dans la chambre d'essais pendant l'essai	51
7.4 Conditions de mesure	51
7.5 Mesures exigées	52
7.6 Composantes d'incertitude	53
7.7 Incidences essentielles sur l'incertitude	54
8 Estimation des composantes d'incertitudes et leur combinaison	58
9 Ensemble des incertitudes d'une mesure de la température	58
9.1 Généralités	58
9.2 Considérations supplémentaires	60
10 Incertitude globale de mesure de l'humidité relative	60
10.1 Incertitude de mesure de la température à chaque point du capteur	61
10.2 Incertitude de la mesure de l'humidité relative	61
11 Présentation des résultats et cas extrême	64
11.1 Analyse du cas moyen	64
11.2 Analyse du cas le plus défavorables	64
Annex A (informative) Ensembles de données de mesure – Chambre d'essais chargée	66
Bibliographie	68

Figure 1 – Approches pour la méthode de calibration et le calcul d’incertitude	49
Figure 2 – Illustration de la stabilité d’un capteur de température.....	57
Tableau 1 – Combinaison des incertitudes de température	58
Tableau 2 – Combinaison des incertitudes de température à chaque point	61
Tableau 3 – Combinaison des incertitudes d’humidité.....	62
Tableau A.1 – Ensemble type de données de mesure de la température et ses analyses et références.....	66
Tableau A.2 – Analyse des mesures de l’humidité basée sur les températures du Tableau A.1	67

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ESSAIS D'ENVIRONNEMENT –

Partie 3-11: Documentation d'accompagnement et guide – Calcul de l'incertitude des conditions en chambres d'essais climatiques

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60068-3-11 a été établie par le comité d'études 104 de la CEI: Conditions, classification et essais d'environnement.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
104/409/FDIS	104/415/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.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série des CEI 60068, publiées sous le titre général *Essais d'environnement*, est disponible sur le site internet de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI 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.

INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 60068 fournit des conseils pour l'analyse des incertitudes de température et d'humidité dans les chambres d'essais climatiques. Elle est destinée aux techniciens, ingénieurs et responsables en essais d'environnement, et à toute personne cherchant à comprendre les résultats des essais d'environnement.

La performance des chambres d'essais climatiques est une préoccupation clé de l'ingénierie en essais d'environnement. Pour satisfaire à toute spécification d'essai, la performance de la chambre d'essais a besoin d'être caractérisée, pour décider si les conditions générées entrent dans les limites spécifiées. Cette caractérisation peut être une tâche difficile, et l'analyse des incertitudes dans la performance d'une chambre d'essais est souvent entourée de confusion. La présente publication est destinée à faciliter ce processus.

Dans ce qui suit est tout d'abord présentée la notion d'incertitude de mesure et ensuite c'est la signification de la tolérance qui est traitée. Les aspects des mesures de l'humidité et de la température sont considérés, ainsi que les méthodes pour déterminer et combiner les incertitudes. Deux cas d'étalonnage sont traités: chambre d'essais à vide et mesure des conditions dans une chambre d'essai en charge. Enfin, des conseils détaillés et des exemples sont présentés pour analyser les résultats de mesures afin de présenter les estimations d'incertitudes.

ESSAIS D'ENVIRONNEMENT –

Partie 3-11: Documentation d'accompagnement et guide – Calcul de l'incertitude des conditions en chambres d'essais climatiques

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60068 montre comment estimer l'incertitude des conditions de température et d'humidité à l'état stable dans une chambre d'essais de température et d'humidité. Sachant que cela est inextricablement lié aux méthodes de mesures, celles-ci sont également décrites.

La présente norme est également applicable à tout type d'environnement, et même les salles ou laboratoires. Les méthodes sont usuellement appliquées aux chambres d'essais régulées en température et aux chambres d'essais régulées en température et humidité.

La présente norme cherche à aider toute personne utilisant des chambres d'essais climatiques. Les personnes étant déjà familières avec l'incertitude de mesure la trouveront utile pour les conseils sur les composantes types d'incertitudes et sur la manière dont il convient de les quantifier et de les combiner. Elle est également destinée à aider le nouvel utilisateur ou l'utilisateur occasionnel qui n'a qu'une faible connaissance du sujet ou pas de connaissance du tout.

Afin d'aborder les incertitudes il est important tout d'abord de comprendre ce qui est mesuré ou caractérisé. L'étalonnage ou la caractérisation de la performance d'une chambre d'essais fait appel à la détermination de l'humidité et de la température de l'air de la chambre, vu par l'objet en essai, à une valeur de consigne donnée. Il convient que cela ne soit pas confondu avec le calibrage ou l'étalonnage du capteur de la chambre d'essai, qui est une opération différente.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

CEI 60068-3-5: *Essais d'environnement – Partie 3-5: Documentation d'accompagnement et guide – Confirmation des performances des chambres d'essais en température*

CEI 60068-3-6: *Essais d'environnement – Partie 3-6: Documentation d'accompagnement et guide – Confirmation des performances des chambres d'essai en température et humidité*

ISO 3534-1:2006, *Statistique – Vocabulaire et symboles – Partie 1: Termes statistiques généraux et termes utilisés en calcul des probabilités*

ISO 3534-2:2006, *Statistique – Vocabulaire et symboles – Partie 2: Statistique appliquée*

Vocabulaire International des termes normalisés généraux et élémentaires de métrologie.
ISO, Genève, Suisse 1993 (ISBN 92-67-10175-1) – VIM

Guide sur l'expression de l'incertitude dans les mesures. ISO, Genève, Suisse 1993 (ISBN 92-67-10188-9) – GUM

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

laboratoire d'étalonnage

laboratoire ou autre organisme qui réalise des étalonnages et qui est accrédité par l'instance d'accréditation nationale appropriée

3.2

chambre d'essais climatiques

enceinte

chambre ou espace clos où la température ou la température et humidité interne(s) peut(peuvent) être contrôlée(s) à l'intérieur de limites spécifiées

3.3

incertitude type composée

incertitude type du résultat d'une mesure obtenue à partir des valeurs d'incertitudes d'autres grandeurs, égale à la racine carrée positive de la somme des différents termes, ces termes étant les variances ou covariances des autres grandeurs pondérées intervenant dans le résultat de mesure

Voir aussi le GUM.

3.4

correction

valeur ajoutée algébriquement au résultat de la mesure pour compenser l'erreur systématique pouvant être déterminée

Voir aussi le VIM.

3.5

niveau de confiance

valeur de la probabilité associée à un intervalle de confiance

NOTE Le niveau de confiance est la probabilité que la « valeur vraie » peut prendre au sein de la plage indiquée d'incertitude généralement exprimée en pourcentage, par exemple 95 %.

Voir aussi l'ISO 3534-1.

3.6

facteur d'élargissement

facteur numérique à multiplier avec l'incertitude type composée pour obtenir une incertitude élargie

NOTE Un facteur d'élargissement de $k=2$ correspond à un niveau de confiance de 95 % approximativement si la distribution est normale et le nombre de degrés de liberté est suffisamment grand.

Voir aussi le GUM.

3.7**température de rosée**

température à laquelle la pression partielle de la vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante au-dessus d'une surface d'eau ou de glace

NOTE La température pour laquelle l'air aurait besoin d'être refroidi (à pression et rapport de mélange de vapeur d'eau constants) pour atteindre la condensation. Un état de condensation existe lorsque l'air est maintenu avec une quantité maximum possible de vapeur d'eau à température et pression existantes.

3.8**dispersion**

propagation de mesures répétées d'une grandeur

3.9**dérive**

variation de l'indication d'un système de mesure non liée à une variation de la grandeur étant mesurée

Voir aussi le VIM.

NOTE La dérive depuis le dernier étalonnage peut être estimée et une correction appliquée aux valeurs mesurées.

3.10**erreur**

différence entre le résultat de mesure et la valeur vraie

3.11**incertitude élargie**

grandeur définissant un intervalle sur le résultat d'une mesure qui peut être attendu pour englober une large fraction de la distribution des valeurs qui peuvent raisonnablement être attribuées au mesurande

Voir aussi le VIM

3.12**stabilité**

variation (depuis la moyenne) de la température ou de l'humidité après stabilisation sur une période de temps en un point de l'espace de travail

NOTE Cela peut être mesuré par écart type ou par écart maximum.

3.13**homogénéité**

différence maximale en valeur moyenne dans le temps, après stabilisation et à tout moment, entre deux points distincts situés dans l'espace de travail

3.14**air incident**

courant d'air conditionné qui circule dans l'espace de travail

3.15**pression partielle de vapeur d'eau**

incidence de la vapeur d'eau, dans un volume d'air donné, à une pression et température constante de l'atmosphère

3.16**instrument de référence**

un instrument préalablement étalonné utilisé pour mesurer les conditions au sein de l'enceinte

3.17

humidité relative

rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante à une température et pression données, exprimé en pourcentage (% HR)

3.18

répétabilité

étroitesse de l'accord entre des résultats indépendants obtenus durant un fonctionnement normal et correct par la même méthode sur un matériel d'essai identique, dans un court intervalle de temps, et avec les mêmes conditions d'essai (telles que le même opérateur, le même matériel, le même laboratoire)

3.19

résolution

plus petites variations des indications de l'affichage de surveillance de la chambre d'essais qui peuvent être clairement distinguées

3.20

pression de vapeur saturante

quantité de vapeur d'eau limite qu'un volume d'air donné, à température constante, peut absorber; au-delà, il y a condensation

3.21

régime établi

état d'équilibre atteint en température/humidité dans la chambre d'essais lorsque toutes les valeurs moyennes dans l'espace de travail sont constantes et se situent à l'intérieur d'une tolérance donnée en température/humidité

3.22

écart type

mesure de la dispersion d'un ensemble de mesures

NOTE L'écart type, s , est la meilleure estimation du sigma (l'écart type de la population).

Voir aussi le GUM et/ou le VIM.

3.23

incertitude type

incertitude du résultat d'une mesure exprimée comme un écart type

Voir aussi le GUM.

3.24

tolérance

limite d'acceptation spécifiée ou choisie pour un processus ou un produit

Voir aussi l'ISO 3534-2.

3.25

tracabilité

propriété du résultat d'une mesure ou de la norme valeur étalon à laquelle il peut être fait référence, généralement des étalons nationaux ou internationaux, à travers une chaîne ininterrompue de comparaisons, prenant en compte des incertitudes

NOTE La chaîne ininterrompue de comparaison est appelée une chaîne de traçabilité.

Voir aussi l'ISO 3534-1 et le VIM.

3.26**valeur vraie**

valeur qui caractérise une quantité parfaitement définie dans les conditions qui existent lorsque cette quantité est considérée

NOTE La valeur vraie d'une quantité est une notion théorique et, en général, ne peut être connue exactement, mais estimée par mesure.

Voir aussi l'ISO 3534-1.

3.27**incertitude**

paramètre, associé au résultat d'une mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourront être raisonnablement attribuées à ce résultat

3.28**budget d'incertitude**

liste des différentes composantes d'incertitudes types permettant d'estimer une incertitude type composée associée à un résultat de mesure

3.29**incidence d'incertitude**

entrée d'un budget d'incertitude

3.30**espace de travail**

partie de la chambre d'essais dans laquelle les conditions spécifiées peuvent être maintenues dans les tolérances spécifiées

4 Notion d'incertitude**4.1 Incertitude, erreur et « valeur vraie »**

Pour chaque mesure - quelque soit l'attention apportée – il y a toujours une marge de doute sur le résultat. En termes simples, l'incertitude d'une mesure est une quantification du doute sur le résultat de mesure.

Lorsqu'on parle d'incertitude, on a souvent besoin de considérer une notion apparentée mais séparée, « l'erreur ». Une « erreur » de mesure est la différence entre la valeur mesurée et la « valeur vraie » de l'élément que l'on mesure.

La « valeur vraie » de toute grandeur est en principe inconnue. Cela conduit à un problème puisque « l'erreur » est définie comme le résultat d'une mesure moins la « valeur vraie ». Parfois, cette différence peut être estimée. Il est recommandé d'éviter ces deux termes autant que possible et, lorsque c'est nécessaire, de les utiliser avec précaution. Il aurait été plus correct de désigner les propos sur « l'analyse de l'erreur », qui étaient habituellement présents dans beaucoup de documents scientifiques, comme « analyse des limites probables de l'erreur », ou, plus correctement, « analyse de l'incertitude ». Dans les publications plus anciennes, le terme « erreur » était couramment utilisé lorsque « incertitude » aurait été le terme correct.

L'incertitude n'est pas la même chose que l'erreur. Si les conditions dans une chambre d'essais sont mesurées avec un instrument étalonné et que le résultat est 75 % HR alors que l'indicateur de la chambre d'essais indique 90 % HR, cela ne veut pas dire que l'incertitude est 15 % HR. Il est reconnu que l'humidité relative est 75 % HR. On est dorénavant conscient que soit la lecture de l'indicateur est fausse soit la chambre d'essais fonctionne d'une manière incorrecte. On a une erreur estimée à 15 % HR. L'incertitude est une caractéristique de la mesure qui donnait l'information 75 % HR. Est-ce que cela pourrait s'avérer faux, et, si oui, de combien ?

Lorsqu'on considère la « valeur vraie », l'incertitude et l'erreur sont une des sources les plus importantes pour un instrument de mesure, et cette information est donnée dans son certificat d'étalonnage. Il est vital d'utiliser toute l'information fournie par le certificat d'étalonnage pour garantir la meilleure estimation des incertitudes d'essai.

4.2 Dispositions sur l'incertitude

4.2.1 Généralités

Lors de l'exploitation des résultats de mesure, trois chiffres sont nécessaires pour une indication métrologique correcte et complète du résultat de chaque point de mesure. Par exemple l'indication complète pourrait être:

La « valeur vraie » est: $39,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ K}$ avec une confiance de 95 %.

- $39,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ est la meilleure estimation de la valeur vraie;
- $\pm 0,3\text{ K}$ est l'intervalle de confiance;
- 95 % est le niveau de confiance.

Une explication de ces trois composantes suit.

4.2.2 Meilleure estimation de la valeur vraie de la grandeur mesurée

Souvent il s'agira simplement de la valeur lue de l'instrument de référence étalonné qui dans le cas d'un essai climatique pourra être la valeur lue du système de mesure de la température ou de l'hygromètre, ou, si la chambre d'essais a été étalonnée, l'affichage de l'indicateur de la chambre d'essais. Si l'étalonnage a montré soit pour un instrument soit pour une chambre d'essais l'existence d'une erreur (qui n'est pas une incertitude), il est recommandé d'utiliser celle-ci pour appliquer une correction. Par exemple si l'étalonnage d'un thermomètre indique une correction de 1 K en plus, il est recommandé de soustraire 1 K à la lecture pour obtenir la meilleure estimation de la valeur vraie.

4.2.3 Intervalle de confiance

Il s'agit de la plage des valeurs mesurées au sein de laquelle existe la « valeur vraie » avec un niveau de confiance donné. Dans notre exemple cet intervalle est de $\pm 0,3\text{ K}$.

4.2.4 Niveau de confiance

Le « niveau de confiance » d'une mesure est un nombre (par exemple 95 %) exprimant le degré de confiance du résultat. Il s'agit de la probabilité que la réelle « valeur vraie » soit contenue dans une plage donnée. La plupart des données sont normalement distribuées et environ 68 % des valeurs tourneront autour de la moyenne plus ou moins un écart type. Environ 95 % des valeurs peuvent être attendues avec plus ou moins 2 écarts type (95 % de niveau de confiance). Autrement dit, lorsque de telles mesures sont réalisées, pas plus de 1 sur 20 sera à l'extérieur des limites établies. C'est ainsi qu'une multiplication par 2 de l'écart type est un moyen acceptable pour couvrir 95 % de la plage de valeurs. Avec un niveau de confiance de 95 %, on est sûr à 95 % que la « valeur vraie » est contenue dans la plage établie.

On travaille conventionnellement avec un niveau de confiance de 95 %. Des niveaux de confiance supérieurs peuvent être utilisés mais l'intervalle de confiance augmentera.

4.2.5 Analyse de l'incertitude

Dans l'exemple ci-dessus, l'analyse de l'incertitude est que la température était de $39,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ K}$ avec une confiance de 95 %. $39,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ est la meilleure estimation de la température mais, à cause des incertitudes, il y a une possibilité que celle-ci se situe dans la plage $38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $39,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec une confiance de 95 %.

4.3 Incertitudes composées

Les incidences d'incertitude doivent être exprimées en termes équivalents avant d'être combinées. Elles doivent avoir les mêmes unités et un niveau de confiance identique. Il est recommandé que toutes les incidences soient converties en incertitudes types par exemple avec un niveau de confiance de plus ou moins un écart type. Cela est abordé davantage dans les Articles 9 et 10.

5 Tolérance

Lorsqu'un ingénieur doit préparer un essai en environnement, une des premières questions qu'il doit se poser est la suivante : « la chambre d'essais atteindra-t-elle et conservera-t-elle les conditions spécifiées ? » Cette question se pose lorsque la spécification de l'essai définira souvent une tolérance pour la condition exigée par exemple $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\pm 5\text{ \% HR}$. En décidant qu'une tolérance est respectée, l'incertitude des valeurs mesurées dans la chambre d'essais doit être prise en compte.

Les tolérances ne sont pas les incertitudes. Les tolérances sont les limites d'acceptation qui sont choisies pour un processus ou un produit. Le plus souvent, l'intérêt de connaître l'incertitude sur les paramètres mesurés dans une chambre d'essais est de s'assurer qu'une tolérance est respectée. Dans ce cas, l'écart par rapport à la condition exigée, en prenant en compte l'incertitude, doit être considéré. En utilisant les valeurs données en 4.2.5, , il est certain à 95 % que la valeur de la température se situe entre $38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $39,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si la condition spécifiée est $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ K}$, alors la probabilité que la température vraie est à l'intérieur de la tolérance est nettement meilleure que 95 %, l'intervalle de confiance de la valeur mesurée étant dans la plage de tolérance.

Si l'humidité mesurée est de 81,7 % HR, et que l'intervalle de confiance est de $\pm 3,6\text{ \% HR}$ avec un niveau de confiance de 95 %, alors il est certain à 95 % que la valeur de l'humidité se situe entre 78,1 % HR et 85,3 % HR. Si la condition spécifiée est de $85 \pm 5\text{ \% HR}$, même si la valeur mesurée était à l'intérieur de cette plage, la probabilité que l'humidité vraie se situe à $\pm 5\text{ \% HR}$ de la valeur de consigne est significativement inférieure à un niveau de confiance de 95 % parce que l'intervalle de confiance de la valeur mesurée n'est pas dans la plage de tolérance. Toutefois, à partir de la tolérance, il existe des méthodes statistiques permettant d'avoir une bonne estimation de ce qui est possible d'obtenir.

6 Mesure de l'humidité et de la température

En réalisant des mesures de l'humidité il existe plusieurs méthodes pour aborder le sujet. Il est généralement supposé que la vapeur d'eau contenue dans l'air est uniforme au sein de la chambre d'essais. C'est une supposition raisonnable, et les personnes ayant réalisé des mesures d'humidité en plusieurs points d'une chambre d'essais peuvent confirmer que c'est généralement le cas. Toutefois, cela ne veut pas dire que l'humidité relative est uniforme.

Etant directement liée à la pression de la vapeur, la température de rosée peut être considérée uniforme à l'intérieur de la chambre d'essais et n'est pas affectée par la température. Il est envisageable que, durant les essais individuels, la mesure de l'humidité soit seulement réalisée en un point. Toutefois, à certains points, soit durant l'essai, soit lorsque la chambre d'essais est en fonctionnement sous des conditions similaires, les mesures de l'humidité doivent être faites au moins à deux emplacements afin d'affecter une incertitude confirmant l'hypothèse que la vapeur d'eau contenue dans l'air est uniforme.

Pour la plupart des essais d'environnement, l'humidité exigée est spécifiée en terme d'humidité relative. Le rôle de l'humidité relative est important puisque le comportement de la plupart des matériaux organiques dépend de ce paramètre. Des facteurs tels que l'expansion physique des plastiques et du bois, l'activité biologique, l'impédance électrique et le taux de corrosion sont des exemples de processus qui dépendent de l'humidité relative.

Dans une chambre d'essais, la pression de la vapeur est souvent pratiquement uniforme.

Même lorsque l'air est minutieusement brassé, il y a souvent des différences significatives de température d'un point à un autre de la chambre d'essai, et, bien que la pression de la vapeur d'eau soit souvent pratiquement uniforme, les différences de température provoquent des différences d'humidité relative. Une seule mesure de l'humidité en un seul point est souvent suffisante pour donner une idée de la pression de la vapeur dans le reste de la chambre. Il est recommandé de faire une seule mesure en un point central ou sur le côté de l'objet en essai.

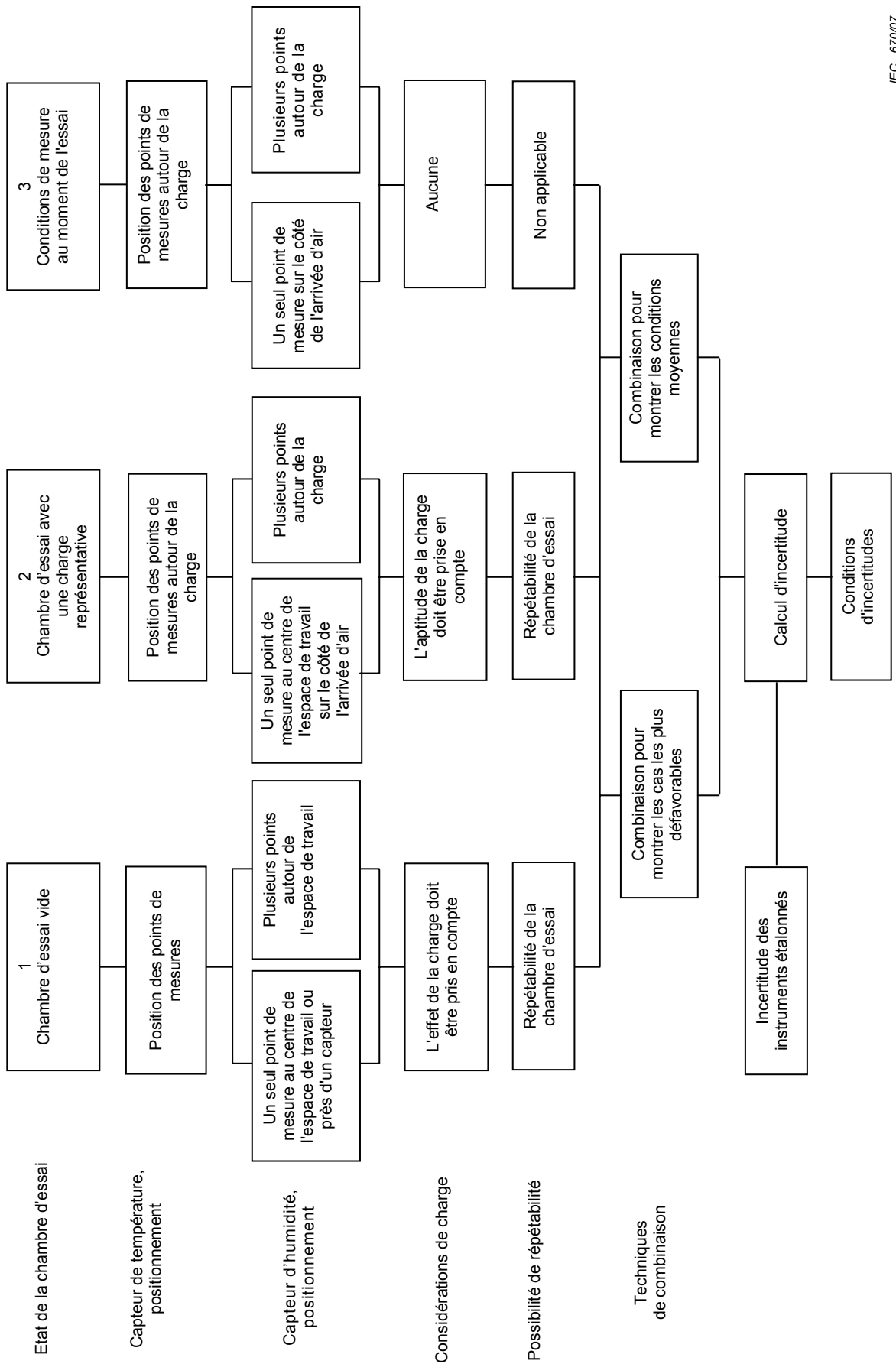
La mesure peut être faite avec n'importe quel type d'hygromètre, les plus couramment utilisés étant les suivants:

- un hygromètre à point de rosée (condensation sur miroir);
- un psychromètre (bulbe humide/sec) ; ou
- un hygromètre à variation d'impédance.

Des exemples sont donnés à l'Annexe A.

7 Méthodes pour déterminer les incertitudes des chambres d'essais climatiques

Il y a trois méthodes de base pour déterminer les conditions dans un chambre d'essais. Ces trois méthodes tiennent compte des exigences spécifiques de différents types d'essai et il y a de bonnes raisons pour chaque approche. Ces méthodes sont illustrées à la Figure 1.



IEC 67007

Figure 1 – Approches pour la méthode de calibration et le calcul d'incertitude

7.1 Chambre d'essais vide

7.1.1 Avantages

Les avantages sont les suivants:

- a) L'intégralité de l'espace de travail est étalonnée.
- b) L'étalonnage n'a besoin d'être réalisé qu'une ou deux fois par an.
- c) Le ré-étalonnage n'est pas exigé lorsque l'échantillon d'essai est changé.
- d) Le fonctionnement de la chambre d'essais peut être évalué sans soumettre l'échantillon d'essai qui sera utilisé.
- e) Coût relativement faible. Seulement un réglage des instruments étalonnés exigé pour plusieurs chambres d'essais.

7.1.2 Inconvénients

Les inconvénients sont les suivants:

- a) L'effet de l'échantillon d'essai est difficile à quantifier, bien qu'il puisse être négligeable pour des échantillons qui sont très petits en comparaison de la chambre d'essais. Il est très difficile d'attribuer une incertitude sur l'effet de la charge.
- b) L'effet des échantillons d'essai dissipant de la chaleur est très difficile à quantifier.
- c) La dérive, résolution et répétabilité de l'indicateur de la chambre d'essais doivent être évaluées et leurs incidences sur les calculs d'incertitude doivent être traitées.

7.2 Charge type

L'étalonnage de la chambre d'essais avec une charge type est préconisé lorsque des essais très similaires sont répétés.

7.2.1 Avantages

Les avantages sont les suivants:

- a) L'effet de la charge sur la surveillance de la chambre d'essais peut être évalué précisément sans soumettre l'échantillon d'essai à une contrainte inconnue.
- b) La plus petite chambre d'essais adaptée qui fournit des conditions satisfaisantes peut être choisie avant l'essai.
- c) Un positionnement minutieux des capteurs peut donner des informations détaillées sur les parties critiques de la charge.
- d) Les anomalies relatives aux charges dissipantes peuvent être quantifiées.
- e) Coût relativement faible. Seulement un réglage des instruments étalonnés exigé pour plusieurs chambres d'essais.

7.2.2 Inconvénients

Les inconvénients sont les suivants:

- a) Le ré-étalonnage est exigé lorsque l'échantillon d'essai est modifié considérablement.
- b) La dérive, résolution et répétabilité de l'indicateur de la chambre d'essais doivent être évaluées et leurs incidences sur les calculs d'incertitude doivent être traitées.

7.3 Mesure des conditions dans la chambre d'essais pendant l'essai

7.3.1 Avantages

Les avantages sont les suivants:

- a) Cette méthode donne la meilleure estimation de la valeur mesurée dans les conditions vérifiées avec l'élément en essai. C'est la méthode idéale lorsque différents types de charge et différents essais sont réalisés.
- b) L'effet de la charge lors de la vérification de la chambre d'essais peut être précisément évalué.
- c) L'historique de la dérive de l'étalonnage de la chambre d'essais n'a pas besoin d'être déterminé.
- d) Un positionnement minutieux des capteurs peut donner des informations détaillées sur les parties critiques de la charge.
- e) Les anomalies relatives aux charges dissipant de la chaleur peuvent être quantifiées.
- f) Cette méthode peut être économique parce que la chambre d'essais n'est pas étalonnée pour les conditions qui ne sont pas exigées.

7.3.2 Inconvénients

Les inconvénients sont les suivants:

- a) Un équipement de mesure est exigé pour chaque essai.
- b) Les calculs d'incertitude doivent être réalisés pour chaque essai.
- c) C'est probablement la méthode la plus onéreuse, l'équipement de mesure étant utilisé en permanence.

7.4 Conditions de mesure

Si les mesures sont réalisées pendant l'essai, alors une incertitude peut être calculée pour cette condition. Sinon, un étalonnage de la chambre d'essais pourrait être réalisé pour chaque condition d'utilisation de la chambre d'essais. Toutefois, en pratique il n'est pas toujours nécessaire de réaliser un étalonnage pour chaque condition possible d'utilisation.

Si les mesures ne sont pas réalisées pendant l'essai, l'ensemble de la séquence de mesures et leur analyse doit être répété pour des conditions qui couvrent au moins une plage d'utilisation. Pour l'évaluation, un exemple est donné dans la CEI 60068-3-6.

Pour les essais en température seulement (par exemple l'humidification à l'arrêt), il est recommandé d'avoir suffisamment de points de mesure avec les conditions suivantes:

- la température la plus haute;
- la température la plus basse;
- au moins deux températures avec le refroidissement en marche;
- au moins deux températures avec le chauffage en marche.

Outre les mesures de la température seule ci-dessus, il convient de réaliser des mesures pour au moins deux valeurs d'humidité, couvrant la plage, pour n'importe quelle condition ci-dessus où les essais d'humidité sont à réaliser.

Il est nécessaire de faire autant de conditions; en effet, la régulation pour chaque niveau d'humidité et de température peut amener la chambre d'essais à avoir des homogénéités et stabilités différentes. La régulation de la température est souvent moins bonne lorsque le système d'humidité est en fonctionnement.

Si la chambre d'essais est seulement utilisée avec peu de valeurs de consigne spécifiques, il suffit de réaliser les étalonnages aux valeurs spécifiées désirées.

Lorsque l'essai n'est pas réalisé aux valeurs d'étalonnage, il est nécessaire d'interpoler entre deux niveaux d'étalonnage. Il est recommandé que l'interpolation soit utilisée avec précaution et de préférence seulement si

- les niveaux d'étalonnage sont raisonnablement proches du niveau d'essai,
- les moyens utilisés pour chaque niveau d'étalonnage (réfrigération, déshumidificateurs, chauffages, etc.) sont les mêmes.

7.5 Mesures exigées

Les mesures exigées sont les mêmes pour toutes les méthodes ; il s'agit simplement de la période où sont réalisées les mesures et comment les résultats sont analysés.

7.5.1 Température

Pour la mesure de la température, un nombre de capteurs de température est utilisé pour mesurer la température aux emplacements définis dans la chambre d'essais. Il existe d'autres normes comme la CEI 60068-3-5 qui donnent des méthodes de mesure mais qui ne prennent pas en compte les incertitudes; elles se réfèrent uniquement aux chambres d'essais vides.

Pour une chambre d'essais vide, huit capteurs sont normalement utilisés aux coins de l'espace de travail, et un neuvième au centre. Pour des chambres d'essais de grandes dimensions, un nombre supérieur de capteurs peut être exigé.

Pour une charge type, ou avec un produit en essai, huit capteurs, un à chaque coin de l'objet, sont généralement utilisés. Pour des produits de très petites dimensions, le nombre de capteurs peut être réduit, mais dans ce cas il est recommandé un minimum de quatre capteurs. Pour des objets de grandes dimensions ou avec des formes bizarres ou nécessitant des valeurs particulières de température et d'humidité, il est recommandé d'utiliser des capteurs supplémentaires, quand cela se justifie.

En présence d'un produit dissipant de la chaleur, la mesure de la température de l'air incident est généralement considérée comme ayant de l'intérêt pour le rapport, mais il est recommandé que les autres capteurs soient toujours utilisés, et ainsi les effets locaux de la chaleur issue du produit en essai peuvent être quantifiés.

7.5.2 Humidité

Pour la mesure de l'humidité, un hygromètre est positionné d'une manière centrale sur le côté du produit en essai ou au centre d'une chambre d'essais vide. N'importe quel type d'hygromètre peut être utilisé, mais trois types sont le plus susceptibles d'être utilisés: à variation d'impédance, un psychromètre, ou un hygromètre à condensation (miroir refroidi). La pression de la vapeur d'eau peut être calculée à partir des mesures de l'humidité et de la température. La pression de la vapeur d'eau est supposée être identique dans la chambre d'essais et l'humidité relative est calculée à partir de cette pression de vapeur d'eau et de celle correspondant à la température à chaque capteur de mesure de la température.

En un certain point, pour chaque condition, une mesure de l'homogénéité de la pression de la vapeur doit être réalisée et ainsi une incertitude due à cette variation peut être calculée. Cette mesure peut être réalisée en utilisant plusieurs sondes d'hygromètre de n'importe quel type. Toutefois, les hygromètres à variation d'impédance et les psychromètres sont également sensibles à la température, et ainsi l'estimation généralement obtenue en utilisant ces instruments sera supérieure à la valeur vraie.

Une autre méthode consiste à échantillonner à partir de plusieurs points répartis dans un tube avec un seul hygromètre avec une commutation en alternance.

L'homogénéité de la pression de la vapeur d'eau est normalement faible et nécessite seulement d'être évaluée occasionnellement.

7.5.3 Procédure d'enregistrement

Pour s'assurer qu'une évaluation correcte soit faite, il est recommandé de réaliser au minimum 5 enregistrements et de préférence 20 ou plus pour chaque capteur et à chaque condition de réglage. Il est recommandé que les enregistrements soient réalisés sur une période de temps suffisante, et ainsi plusieurs contrôles de stabilité de la chambre d'essais peuvent être enregistrés. Une durée de 30 min est généralement suffisante.

Les enregistrements sont effectués pour chaque capteur après une stabilisation de la chambre d'essais à chaque condition de réglage.

Il est recommandé que les mesures soient prises régulièrement pour chaque capteur au cours de la période d'essai. Le Tableau A.1 montre un ensemble type de données, avec certaines d'entre elles relatives à l'analyse des résultats.

Il est essentiel de s'assurer que les intervalles entre les mesures ne coïncident pas avec l'intervalle cyclique de la chambre d'essais.

7.6 Composantes d'incertitude

Dans toute mesure, des incertitudes surviennent suite à quatre composantes élémentaires.

7.6.1 Incertitudes d'étalonnage

Les incertitudes d'étalonnage pour les instruments utilisés sont listées dans le certificat d'étalonnage. Elles sont normalement à un niveau de confiance de 95 %. Les incertitudes d'étalonnage présentées sur un certificat d'étalonnage mentionnent la résolution de l'instrument ainsi que les variations de courte durée relevées durant l'étalonnage et l'incertitude de mesure; il faut veiller à les prendre en compte.

7.6.2 Incertitudes instrumentales

Les incertitudes instrumentales prennent en compte les facteurs tels que la résolution, la répétabilité et la dérive des instruments utilisés. Les résultats obtenus à partir d'une série de mesures peuvent permettre de se prémunir contre les erreurs flagrantes et donnent une meilleure confiance dans les incertitudes estimées.

7.6.3 Incertitudes survenant au moment de la mesure

Les incertitudes au moment de la mesure sont principalement liées à l'homogénéité et la stabilité des conditions. La méthode de mesure doit permettre d'identifier ces homogénéité et stabilité.

7.6.4 Incertitude par radiation

Les effets de radiation peuvent être importants dans certaines chambres d'essais. Si les valeurs mesurées par les thermomètres sont incohérentes ou varient beaucoup d'un essai à un autre ou s'il y a une moindre raison de suspecter que cette radiation pourrait créer un problème (par exemple si la température de n'importe quelle partie de la chambre d'essais qui peut être à la portée de l'élément en essai est significativement différente de la température de réglage), alors il est recommandé qu'un essai supplémentaire soit réalisé avec des thermomètres qui ont des couleurs de radiation différentes (par exemple une brillante à côté d'une noire). Pour les températures au-dessus de +100 °C, l'effet des radiations a de plus en plus d'influence sur le capteur de mesure et le spécimen.

7.6.5 Incertitudes additionnelles

Tout autre facteur qui peut affecter la mesure, par exemple les différences entre les conditions ambiantes sous lesquelles l'étalonnage est réalisé et celles sous lesquelles les mesures ont lieu, doivent être prises en compte.

Les incertitudes d'étalonnage peuvent ne pas être complètement pertinentes avec les conditions d'utilisation. Par exemple, la plupart des organismes d'étalonnage étalonne les capteurs de température dans des bains d'huile, de sel ou de solvant. Les extrémités des capteurs sont immergées, laissant les câbles exposés à la température de la pièce, alors qu'à l'utilisation les capteurs et les câbles peuvent être immergés dans l'environnement de la chambre d'essais. Par conséquent à l'étalonnage, il y a un effet de conduction de chaleur qui n'est pas présent à l'utilisation. Cet effet doit être estimé et son amplitude évaluée ou estimée si ce n'est pas possible. Il est recommandé que l'incertitude de la correction évaluée (estimée) soit alors incluse dans le budget d'incertitude.

7.7 Incidences essentielles sur l'incertitude

Ce paragraphe présente les principales composantes d'incertitudes, mais il n'est pas exhaustif. L'établissement d'une liste des composantes d'incertitudes est la première étape de toute analyse de l'incertitude. Il convient que cette liste identifie toutes les composantes d'incertitudes, même si certaines d'entre elles peuvent paraître insignifiantes.

7.7.1 Incertitude d'étalonnage de l'instrument de référence

Il s'agit de l'incertitude indiquée sur le certificat d'étalonnage, à ne pas confondre avec « l'erreur » ou « la correction » mentionnée sur le certificat. Plusieurs mesures de référence peuvent être prises en considération, en prenant en compte l'incertitude d'étalonnage de chaque composante de l'ensemble des incertitudes de mesures.

7.7.2 Dérive de l'instrument de référence

La plupart des instruments dérivent lentement avec le temps. Les conditions d'utilisation peuvent affecter le taux de dérive et pour certains instruments l'effet peut être significatif. Les données issues d'étalonnages successifs sont essentielles pour estimer les limites de la dérive lors de l'utilisation, mais en premier lieu les données du fabricant peuvent être utilisées comme estimations. Toutefois, il est à noter que les fabricants en général donnent des valeurs de dérives dans des conditions idéales d'utilisation; dans ce cas, il convient donc généralement de majorer ces valeurs. La dérive de tous les instruments utilisés doit être prise en compte.

7.7.3 Résolution

Il s'agit de la résolution des instruments de référence utilisés pour mesurer les conditions dans la chambre d'essais. La résolution de l'indicateur de la chambre d'essais doit être incluse dans l'analyse de l'incertitude mais il est recommandé de ne pas l'utiliser lorsque les mesures sont réalisées au moment de l'essai.

7.7.4 Influence de la température

L'influence de la température peut être vraiment significative pour certains instruments. Les instruments fonctionnant près d'une chambre d'essais climatique sont souvent influencés par des variations de température ambiante. En général, même lorsque la température est stable, les effets de la température demandent une évaluation minutieuse des instruments afin de pouvoir appliquer des corrections. Toutefois, les incertitudes sur la détermination de la correction s'appliquent, même après que des corrections ont été effectuées.

7.7.5 Hystérésis

L'hystérésis est la différence entre la mesure d'un instrument fonctionnant en valeur croissante et la mesure en valeur décroissante. L'hystérésis peut être importante pour certains types de sonde d'humidité relative, et pour certains types de capteur de température.

7.7.6 Répétabilité de la mesure

La répétabilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures successives répétées sur un même mesurande sous les mêmes conditions.

7.7.7 Stabilité

La stabilité caractérise la variation d'un paramètre mesuré sur une période de temps. Elle est présente dans la plupart des situations de mesure. Dans les essais d'environnement, elle représente généralement l'une des plus importantes incidences sur l'incertitude globale.

La stabilité en humidité dépend de deux composantes principales. La teneur en vapeur de l'air (pression de la vapeur ou température de rosée) peut varier. En plus, la variation de la température provoque une variation en humidité relative même lorsque la teneur en vapeur est relativement stable. L'influence de ces deux composantes doit être prise en compte et incluse dans l'analyse de l'incertitude.

Les mesures réalisées par les capteurs d'humidité et de température peuvent varier différemment et ne pas montrer nécessairement ce qui se passe réellement dans une chambre d'essais. Pour déterminer l'étendue des variations, plusieurs mesures doivent être réalisées avec des instruments ayant un temps de réponse rapide. La plupart des chambres d'essais suivent des cycles selon un modèle régulier autour de la valeur de consigne et, si des mesures sont prises à un même point à chaque cycle (par exemple toujours au maximum de chaque cycle), le résultat pourra être faussé. Cela est appelé une « distorsion », et des précautions doivent être prises pour la détecter et l'éviter, par exemple un échantillonnage devra être réalisé avec un temps de scrutation au moins quatre fois plus rapide que le cycle de régulation de la chambre d'essais ou en échantillonnant à des intervalles aléatoires.

L'effet des variations sur le calcul de la moyenne peut être réduit en prenant un nombre important de mesures et en calculant l'incertitude de la valeur moyenne. L'amélioration du résultat dépend de la racine carrée du nombre de lectures et un nombre de 20 mesures est normalement suffisant.

Un capteur à temps de réponse rapide (faible dimension) mesurera les valeurs extrêmes de la régulation cyclique d'une chambre d'essais climatique. Par contre, un capteur à temps de réponse lent (dimensions importantes) peut aussi montrer le cycle de régulation, mais les valeurs extrêmes enregistrées seront atténuées, du fait de la réponse lente du capteur. Par conséquent, une composante de l'incertitude correspondant à la réponse du capteur peut être incluse dans le calcul d'incertitude.

Des variations de température sont illustrées à la Figure 2 (ci-dessous).

7.7.8 Homogénéité

L'homogénéité est la variation de la grandeur mesurée entre deux points de l'espace de travail. Dans la plupart des essais d'environnement, l'homogénéité en température est la plus importante composante particulière d'incertitude. Pour estimer l'étendue de l'homogénéité en température, des mesures doivent être prises à différents emplacements situées autour du spécimen en essai ou autour de l'espace de travail de la chambre d'essais lorsque qu'on étalonne une chambre d'essais vide.

L'homogénéité de la teneur en vapeur d'eau de l'air dans la chambre d'essais est généralement relativement faible sauf lorsqu'il y a de la condensation partout dans la chambre d'essais. Toutefois, comme pour la stabilité, l'homogénéité en température induit une homogénéité en humidité relative même lorsque la teneur en vapeur d'eau est relativement constante.

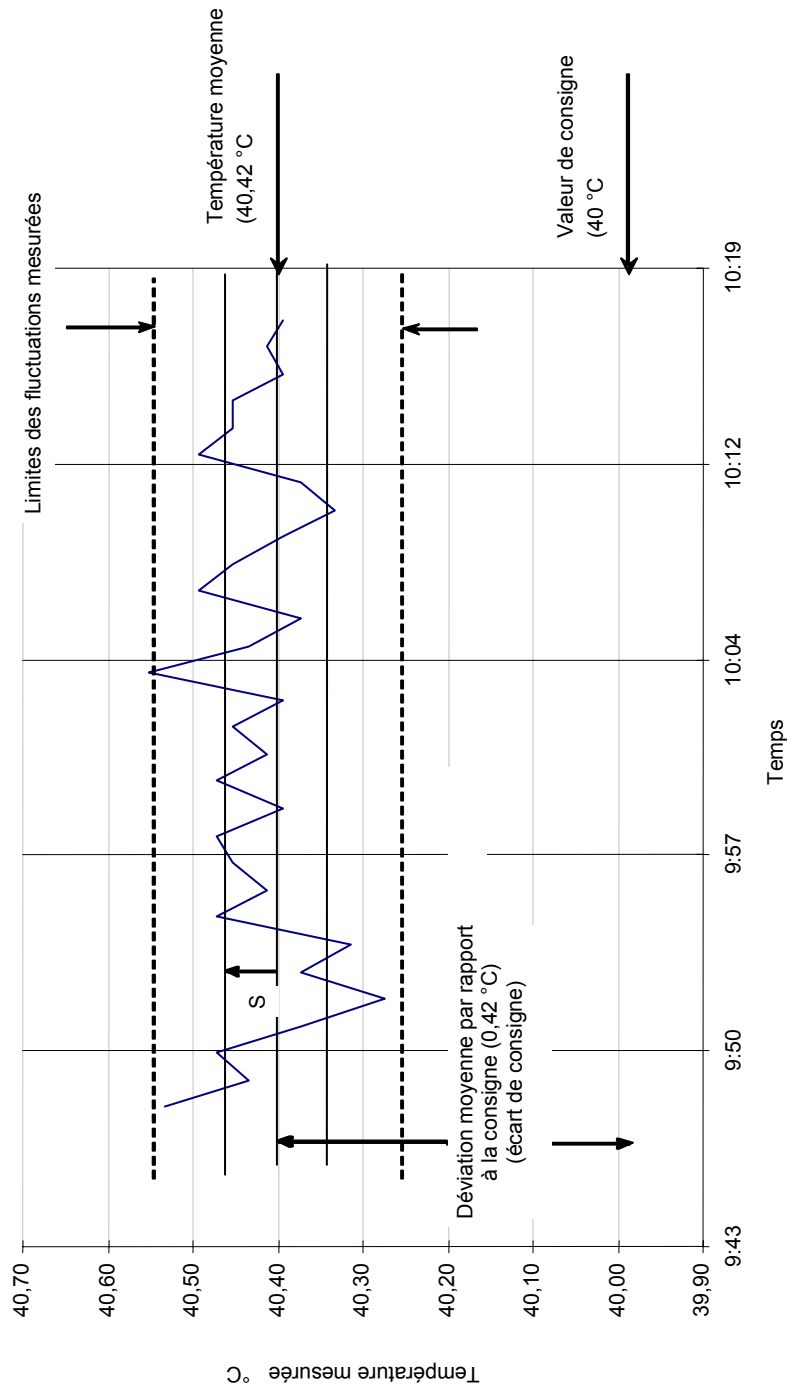
7.7.9 Incertitudes supplémentaires lors de l'étalonnage d'une chambre d'essais vide ou d'une chambre avec une charge type

Celles-ci peuvent inclure ce qui suit:

- dérive des instruments de la chambre d'essais;
- répétabilité des instruments de la chambre d'essais;
- résolution des instruments de la chambre d'essais.

Une considération majeure est l'effet de l'échantillon d'essai dans les conditions de la chambre d'essais. Sauf dans le cas où les dimensions de l'échantillon d'essai sont insignifiantes par rapport à l'espace de travail de la chambre d'essai, il est recommandé de donner des indications sur la méthode utilisée pour déterminer l'incidence de l'échantillon sur l'incertitude.

Il est recommandé que des considérations particulières soient données pour des charges dissipant de la chaleur.



IEC 671/07

Figure 2 – Illustration de la stabilité d'un capteur de température

8 Estimation des composantes d'incertitudes et leur combinaison

L'estimation et la combinaison de toutes les incertitudes présentes dans une mesure se font d'une manière plus simple en utilisant un tableur. L'exemple cité ci-dessous est typique d'une évaluation basée sur l'ensemble des incertitudes de mesure de la température, comme présenté à l'Article 9.

Le tableau inclut des exemples prenant en compte différents types de composantes d'incertitude, tels que les incertitudes d'étalonnage mentionnées dans les certificats, les incertitudes liées aux effets aléatoires des mesures répétées et les incertitudes systématiques telles que les erreurs et les dérives qui sont estimées ou calculées.

L'évaluation de l'incertitude globale d'une mesure ou d'un étalonnage est un processus à trois étapes:

- Chaque composante d'incertitude doit être identifiée, quantifiée et représentée comme une incertitude type.
- L'effet combiné des composantes individuelles est donné par la racine carrée de la somme de ces composantes au carré. Celui-ci est connu comme l'incertitude type composée.
- Celui-ci, à son tour, est ensuite multiplié par un facteur d'élargissement, de $k = 2$, pour donner l'incertitude élargie, qui peut être interprétée comme un intervalle de confiance qui inclura la valeur vraie de la valeur mesurée avec une probabilité de 95 %.

Les processus pour identifier et quantifier les composantes d'incertitudes qui sont incluses dans cette analyse sont abordés à l'Article 9 pour les chambres d'essais de température et à l'Article 10 pour les chambres d'essais combinées d'humidité et de température.

9 Ensemble des incertitudes d'une mesure de la température

9.1 Généralités

Le Tableau 1 ci-dessous illustre la méthode de combinaison des incertitudes en utilisant les données de réglage du Tableau A.1. Chaque composante d'incertitude est décrite en détail dans le texte qui suit le Tableau 1. Cette méthode est utilisée pour les chambres d'essais de température et également pour les chambres d'essais combinant l'humidité et la température.

Tableau 1 – Combinaison des incertitudes de température

	Composante d'incertitude	Valeur °C	Distribution	Diviseur	Incrtitude type	Carré
Instrument de référence	Etalonnage	0,100	Normale	2,00	0,050	0,002 500
	Répétabilité	0,010	Normale	1,00	0,010	0,000 100
	Hystérésis	0,010	Rectangulaire	1,73	0,006	0,000 033
	Effets de température	0,010	Rectangulaire	1,73	0,006	0,000 033
	Dérive	0,100	Rectangulaire	1,73	0,058	0,003 333
	Linéarité	0,020	Rectangulaire	1,73	0,012	0,000 133
	Résolution	0,010	Rectangulaire	1,73	0,006	0,000 033
Chambre d'essais	Température	0,469	Normale	1,00	0,469	0,219 961
	Homogénéité					
	Stabilité de température	0,061	Normale	1,00	0,061	0,003 721
	Moyenne globale	0,026	Normale	1,00	0,026	0,000 676

Somme des carrés	0,230 525
Incertitude type composée	$\pm 0,480$ K
Incertitude élargie avec une confiance de 95 %	$\pm 0,96$ K

L'incertitude d'étalonnage de l'instrument de référence, $\pm 0,1$ K, est l'incertitude donnée par le certificat d'étalonnage des thermomètres. L'incertitude d'étalonnage peut être considérée comme une distribution normale s'agissant de la somme de nombreuses composantes de la chaîne d'étalonnage. Elle est donnée dans le certificat avec un niveau de confiance de 95 %, et se divise par 2 pour obtenir une incertitude type.

Il convient si possible de déterminer la répétabilité lors d'un essai préliminaire. Si la valeur est calculée à partir d'une série de mesures répétées, dans ce cas de $\pm 0,01$ K, la répétabilité de la série de lectures se calculera à partir d'une distribution normale caractérisée par une valeur moyenne et un écart type estimé. L'incertitude type est égale à l'écart type (c'est-à-dire que le diviseur a une valeur de 1). Dans certains cas, la valeur peut être prise à partir de tolérances données par le fabricant du thermomètre et traitée comme une distribution de probabilité rectangulaire comme décrit dans le paragraphe suivant.

L'hystérésis est la différence en sortie des températures mesurées en valeurs croissantes et décroissantes. La valeur de $\pm 0,01$ K est issue d'un certificat d'étalonnage. Les thermomètres étant étalonnés une première fois, des mesures en valeurs croissantes et décroissantes sont réalisées et exploitées en milieu de plage pour déterminer cette valeur. Une distribution de probabilité rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carrée de 3 pour obtenir l'incertitude type.

L'effet de température résulte du coefficient de température de l'électronique de l'instrument de mesure de température, et des variations de température constatées durant l'utilisation. A partir de la spécification du fabricant (0,001 K/K) et des conditions de fonctionnement (20 ± 10) °C, il est calculé que les effets ne puissent pas dépasser $\pm 0,01$ K. Il n'y a pas de moyen pour connaître la probabilité qu'il fonctionne au centre ou aux limites de la plage et, ainsi, il est recommandé d'utiliser une distribution de probabilité rectangulaire. Cette distribution de probabilité rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carrée de 3 pour obtenir l'incertitude type. Elle est égale à l'écart type (le diviseur a une valeur globale de racine carrée de 3).

La dérive de l'instrument de référence peut être estimée en comparant les historiques des certificats d'étalonnage. Dans l'exemple ci-dessus, une modification de 0,1 K était apparue entre les étalonnages. L'hypothèse est faite que toute dérive ultérieure pourrait être dans les limites de celle prise en compte dans le calcul d'incertitude. Une distribution rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carrée de 3 pour obtenir l'incertitude type.

La non-linéarité est l'amplitude de l'écart de la sortie du capteur ou de l'instrument par rapport à une ligne droite, calculée avec une méthode de régression linéaire. Il est supposé que l'écart pourrait être dans l'une des directions et probablement tout aussi proche de la valeur de non-linéarité établie. De plus, il convient d'utiliser une distribution rectangulaire, avec une valeur de $\pm 0,02$ K, en divisant les limites par racine carrée de 3 pour obtenir l'incertitude type.

La résolution, de 0,01 K dans ce cas, est une incertitude associée à l'affichage numérique. En faisant un simple relevé, il n'est pas possible de dire si l'affichage est sur le point de changer vers la valeur supérieure ou inférieure suivante. Cela signifie que la valeur réelle se situe entre les limites inférieure et supérieure et, ainsi, une distribution rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carrée de 3 pour obtenir l'incertitude type. Avec certains instruments il peut être décidé que la moitié de cette valeur peut être prise en compte (c'est-à-dire $\pm 0,005$ K).

L'homogénéité en température peut être déduite des mesures du Tableau A.1. A chaque mesure, la moyenne et l'écart type de huit capteurs ont été calculés. L'écart type est une mesure représentant l'homogénéité en température. L'hypothèse la plus sûre est de prendre en compte la valeur la plus importante de l'écart type, à savoir $\pm 0,469$ K. L'incertitude correspond à un écart type de mesures répétées et ainsi une distribution normale peut être utilisée avec un diviseur égal à 1. S'il y a une grande variation des écarts types il peut être conseillé de prendre la différence la plus grande et de traiter la plage obtenue comme une distribution rectangulaire.

Les valeurs de la stabilité proviennent aussi des données du Tableau A.1. Pour chaque capteur la moyenne et l'écart type sur la période de l'essai ont été calculés. L'écart type permet la détermination de la stabilité. Pour plus de sûreté, la valeur la plus importante de l'écart type, à savoir $\pm 0,061$ K, sera prise en compte. De nouveau, il s'agit d'un écart type, et une distribution normale peut être utilisée avec un diviseur égal à 1. Comme pour l'homogénéité, s'il y a une grande variation des écarts types il peut être approprié de prendre la différence la plus grande et de traiter la plage obtenue comme une distribution rectangulaire.

La moyenne globale de toutes les mesures du Tableau A.1 est de $39,8$ °C et il doit être pris en considération la possibilité que cette valeur ne représente pas la valeur vraie de la moyenne. La valeur entrant dans le budget d'incertitude, $0,026$ K, est en fait l'écart type global donné dans le Tableau A.1, $\pm 0,397$ K, divisé par la racine carrée du nombre de mesures (240). Cette composante, référencée comme « l'écart type de la moyenne », peut apparaître négligeable mais est incluse de manière exhaustive. Si seulement quelques mesures étaient faites, cela pourrait devenir significatif.

Le résultat de cette analyse pour les mesures effectuées durant l'essai avec un équipement de référence étalonné permet d'annoncer le résultat suivant:

La température moyenne dans cet exemple était $39,8 \pm 0,96$ °C avec un niveau de confiance de 95 %.

Lorsqu'on réalise une analyse d'incertitude, de nombreuses suppositions sont faites, comme cela est indiqué dans l'analyse ci-dessous, et il convient qu'elles soient clairement exposées. En général, de faibles erreurs résiduelles dans ces suppositions n'apporteront pas une différence significative sur le résultat, sauf si elles concernent une des deux ou trois composantes d'incertitude les plus importantes.

9.2 Considérations supplémentaires

Si l'exemple ci-dessus concerne des mesures faites au moment de l'essai, l'incertitude en température est de $\pm 0,96$ K.

Si les mesures sont faites avec une charge type, il est également nécessaire de prendre en compte la résolution et la dérive de la chambre d'essais. Cela nécessite d'être combiné (en réalisant une somme en quadrature) avec l'incertitude de mesure pour obtenir l'incertitude globale des conditions expérimentées par le spécimen en essai.

Si les mesures sont faites durant l'étalonnage d'une chambre d'essais vide, une addition supplémentaire aux incidences d'incertitude mentionnées ci-dessous est requise pour prendre en compte le possible effet de la charge.

10 Incertitude globale de mesure de l'humidité relative

Avant d'évaluer l'incertitude de la mesure de l'humidité relative au moment de la mesure, il est nécessaire d'estimer l'incertitude de la température à l'emplacement des capteurs où sont mesurées ces températures, ces valeurs étant utilisées pour le calcul de l'humidité relative.

10.1 Incertitude de mesure de la température à chaque point du capteur

Le Tableau 2 présente l'évaluation de l'incertitude de température aux points de la chambre d'essais qui permettra ensuite l'évaluation de l'incertitude en humidité à ces points. Les composantes d'incertitude impliquées et leur analyse sont vraiment similaires à ceux de l'exemple donné à l'Article 9, à l'exception des incidences d'incertitudes pour l'effet de l'homogénéité et l'incertitude de la moyenne globale qui ne sont pas prises en compte dans ce tableau. La combinaison des incertitudes types est réalisée d'une manière plus pratique en utilisant un tableau.

Tableau 2 – Combinaison des incertitudes de température à chaque point

	Composante d'incertitude	Valeur K	Distribution	Diviseur	Incertitude type	Carré
Instrument de référence	Etalonnage	0,100	Normale	2,00	0,050	0,002 500
	Répétabilité	0,010	Normale	1,00	0,010	0,000 100
	Hystérésis	0,010	Rectangulaire	1,73	0,006	0,000 033
	Effets de température	0,010	Rectangulaire	1,73	0,006	0,000 033
	Dérive	0,100	Rectangulaire	1,73	0,058	0,003 333
	Linéarité	0,020	Rectangulaire	1,73	0,012	0,000 133
	Résolution	0,010	Rectangulaire	1,73	0,006	0,000 033
	Stabilité en température de la chambre d'essai	0,061	Normale	1,00	0,061	0,003 721

Somme des carrés 0,009 853

Incertitude type composée $\pm 0,099$ K

Incertitude élargie avec une confiance de 95 % $\pm 0,20$ K

10.2 Incertitude de la mesure de l'humidité relative

Dans cet exemple, chaque valeur d'humidité relative du Tableau A.2 a été calculée à partir de la température de rosée (colonne de gauche du Tableau A.2) déterminée avec le capteur d'humidité et chaque température des différents capteurs de température du Tableau A.1.

Cette analyse considère le budget d'incertitude pour la mesure de l'humidité relative. En général, les suppositions faites en identifiant les composantes d'incertitudes et la façon dont les valeurs d'incertitudes sont obtenues sont similaires au premier exemple, mais il y a une différence importante: de nombreuses valeurs incluses dans le budget d'incertitude proviennent des incertitudes sur la température ou la température de rosée. Toutes les valeurs d'incertitude et des incertitudes type doivent être converties en unités d'humidité relative avant qu'elles puissent être combinées.

Dans notre exemple les conditions sont théoriquement à 40 °C et 85 % HR. A ces conditions, un écart de la température de $\pm 0,1$ K correspond à un écart de $\pm 0,45$ % HR. Un écart de la température de rosée de $\pm 0,1$ K a pratiquement le même effet. Ainsi, pour calculer une incertitude en humidité relative à partir d'une incertitude de température de rosée ou de température, il est nécessaire de multiplier chaque terme par 4,5 %/K. Ce facteur est parfois appelé le coefficient de sensibilité et il convient de le calculer pour chaque condition.

Pour déterminer le coefficient de sensibilité, calculer l'humidité relative à partir de la température de rosée et de la température et ensuite répéter le calcul en changeant la température de rosée ou la température de 0,1 K. Le résultat donnera la sensibilité.

Tableau 3 – Combinaison des incertitudes d'humidité

	Composante d'incertitude	Valeur % HR	Distribution	Diviseur	Incrtitude type	Carré
Instrument de référence	Étalonnage de l'instrument	0,900	Normale	2,00	0,450	0,202 500
	Répétabilité	0,225	Normale	1,00	0,225	0,050 625
	Hystérésis	0,045	Rectangulaire	1,73	0,026	0,000 675
	Effet de température	0,225	Rectangulaire	1,73	0,130	0,016 900
	Dérive hygrométrique	0,450	Rectangulaire	1,73	0,260	0,067 600
	Linéarité	0,225	Rectangulaire	1,73	0,130	0,016 900
	Résolution de l'hygromètre	0,450	Rectangulaire	1,73	0,260	0,067 600
Chambre d'essais	Stabilité en humidité	0,755	Normale	1,00	0,755	0,570 025
	Homogénéité en humidité due à la température	2,130	Normale	1,00	2,130	4,536 900
	Homogénéité de la pression de vapeur	0,900	Rectangulaire	1,73	0,520	0,270 400
	Effet de l'incertitude de température sur l'humidité	0,896	Normale	2,00	0,448	0,200 704
	Moyenne globale	0,124	Normale	1,00	0,124	0,015 376

Somme des carrés 6,016 205

Incrtitude type composée $\pm 2,453$ % HR

Incrtitude élargie avec une confiance de 95 % $\pm 4,9$ % HR

L'incertitude d'étalonnage de l'instrument de référence, $\pm 0,2$ K de température de rosée, est donnée par le certificat d'étalonnage de l'hygromètre. Elle est multipliée par le facteur de sensibilité (4,5) pour être convertie en humidité relative soit 0,900 % HR. L'incertitude d'étalonnage peut être considérée comme une distribution normale s'agissant de la somme de nombreuses composantes de la chaîne d'étalonnage avec un niveau de confiance de 95 %. Cette incrtitude se divise par 2 pour obtenir une incrtitude type.

Il convient si possible de déterminer la répétabilité lors d'un essai préliminaire. La répétabilité de la série de lectures se calculera à partir d'une distribution normale, dans cet exemple de $\pm 0,05$ K de la température de rosée, valeur multipliée par 4,5 pour être convertie en humidité relative. Le diviseur a une valeur de 1 pour obtenir une incrtitude type. Dans certains cas, la valeur peut être prise à partir de tolérances données par le fabricant de l'instrument et traitée comme une distribution de probabilité rectangulaire.

L'hystérésis est normalement négligeable pour les hygromètres à condensation, mais pour les sondes d'humidité relative elle peut être de plusieurs pourcents. Elle est déterminée à partir de l'exploitation des mesures en valeurs croissantes et décroissantes lors du premier étalonnage. Dans cet exemple où l'étalonnage ne fait pas apparaître de valeurs d'hystérésis significatives, une valeur de $\pm 0,01$ K de température de rosée est prise par précaution. Elle est multipliée par 4,5 pour être convertie en humidité relative et est supposée être une distribution rectangulaire et est utilisée en divisant les limites par la racine carré de 3 pour obtenir l'incrtitude type.

L'effet de température résulte du coefficient de température de l'électronique de l'hygromètre. A partir de la spécification du fabricant (0,005 K de température de rosée/K), et des variations de température constatées durant l'utilisation (20 ± 10) °C, il est estimé que l'effet ne puisse pas dépasser $\pm 0,05$ K de température de rosée. Cette valeur est multipliée par 4,5 pour être convertie en humidité relative et est supposée être une distribution rectangulaire et est utilisée en divisant les limites par la racine carré de 3 pour obtenir l'incrtitude type.

La dérive de l'hygromètre de référence est estimée en comparant les historiques des certificats d'étalonnage. Dans l'exemple ci-dessus, une variation de 0,1 K de température de rosée est constatée entre les étalonnages. Cette valeur est multipliée par 4,5 pour être convertie en une humidité relative et est supposée être une distribution rectangulaire. Une distribution rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carré de 3 pour obtenir l'incertitude type.

La linéarité est estimée en observant les données du certificat d'étalonnage de l'hygromètre de la même façon que pour le thermomètre. La non-linéarité de $\pm 0,05$ K de température de rosée est multipliée par 4,5 pour être convertie en humidité relative et est supposée être une distribution rectangulaire. Une distribution rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carré de 3 pour obtenir l'incertitude type.

La résolution de l'hygromètre est $\pm 0,1$ K de température de rosée. Cette valeur est multipliée par 4,5 et une distribution rectangulaire est supposée. Une distribution rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carré de 3 pour obtenir l'incertitude type.

Chaque valeur d'humidité relative du Tableau A.2 est calculée à partir de la température de rosée de la seconde colonne et de la mesure de chaque température correspondante du Tableau A.1 et ainsi les valeurs d'humidité relative incluent l'effet de température.

Les valeurs de la stabilité en humidité relative sont déduites des données du Tableau A.2 de la même façon que pour la température. Pour chaque capteur de température, la moyenne et l'écart type de l'humidité relative sur la période de l'essai ont été calculés. Pour plus de sûreté, la valeur la plus importante de l'écart type, soit $\pm 0,755$ % HR, sera prise en compte. L'écart type est calculé avec une distribution normale en prenant un diviseur égal à 1 pour déterminer l'incertitude type.

L'homogénéité en humidité est également déduite des résultats du Tableau A.2. Comme dans le Tableau A.1, la moyenne et les écarts types de l'humidité relative calculés au niveau de chacun des huit capteurs de température ont été calculés à chaque emplacement de mesure. L'hypothèse la plus sûre est de prendre la valeur la plus importante de l'écart type, soit $\pm 2,130$ % HR. Il s'agit d'un écart type et une distribution normale est utilisée et le diviseur est 1 pour déterminer l'incertitude type.

L'homogénéité de la pression de la vapeur peut être mesurée par échantillonnage en différents points de la chambre d'essais en mesurant la température de rosée de l'échantillon. La mesure de l'homogénéité de la pression de la vapeur peut aussi être effectuée avec plusieurs capteurs d'humidité relative, mais dans ce cas les résultats sont plus incertains (et généralement plus importants) à cause de l'influence de la température et aussi des incertitudes d'étalonnage des sondes. L'essai a montré que l'homogénéité était inférieure à $\pm 0,2$ K de température de rosée. Elle est multipliée par 4,5 pour être convertie en humidité relative et est supposée être une distribution rectangulaire. Une distribution rectangulaire est utilisée en divisant les limites par la racine carré de 3 pour obtenir l'incertitude type.

L'incertitude de mesure de la température à chaque point contribue aussi à l'incertitude en humidité relative. Cette valeur est obtenue à partir du calcul précédent (Tableau A.2), comme évaluée ci-dessus. La valeur de l'incertitude élargie, $\pm 0,20$ K, est multipliée par 4,5 pour être convertie en une humidité relative avec une distribution normale. La valeur de l'incertitude type composée est donnée dans le Tableau 3.

Finalement, la moyenne globale de toutes les mesures, 84,9 % HR, est basée sur une analyse statistique de toutes les mesures et il doit être pris en considération la possibilité que cette valeur ne représente pas la valeur vraie de la moyenne. La valeur calculée de 0,124 correspond à l'écart type global, $\pm 1,924$ % HR, divisé par la racine carrée du nombre de mesures (240); cette valeur représente l'incertitude type.

Le résultat de cette analyse pour les mesures effectuées durant l'essai avec un équipement de référence étalonné permet d'annoncer le résultat suivant:

L'humidité moyenne autour du spécimen en essai était de $84,9 \pm 4,9$ % HR avec un niveau de confiance de 95 %.

Si les mesures étaient réalisées pour étalonner une chambre d'essai, avec ou sans une charge, des incertitudes supplémentaires devraient être incluses, comme mentionné en 8.1.

11 Présentation des résultats et cas extrême

Il y a deux approches pour calculer l'incertitude dans la mesure des conditions d'environnement dans une chambre d'essais. La première est de baser le calcul sur les conditions moyennes au sein de la chambre d'essais et la seconde sur les conditions les plus défavorables. Le choix de l'approche dépend du type d'équipement qui est en essai, et des exigences du client.

11.1 Analyse du cas moyen

L'analyse du cas moyen conduit à un postula de la forme: la condition de mesure durant l'essai était une condition $\pm$ une incertitude avec une confiance de 95 %. Par exemple, $39,8\text{ °C} \pm 0,96\text{ K}$ avec un niveau de confiance de 95 %. Dans ce cas, c'est la condition de mesure moyenne, et cela peut ou peut ne pas être ce qui était requis par l'essai.

L'approche du « cas moyen » indique aussi précisément que possible la condition réelle tout en associant une incertitude. Dans les essais prenant en compte l'humidité, il sera souvent montré que l'essai ne permet pas de retrouver des spécifications types, mais il indiquera au moins ce qui s'est produit et avec quelle incertitude.

11.2 Analyse du cas le plus défavorable

Il convient que les données soient toujours examinées pour analyser les anomalies. Si, lors de l'examen, il est démontré qu'une valeur d'un capteur particulier ou qu'une valeur moyenne sur une courte durée a été supérieure à la moyenne de trois écarts types, il pourrait être approprié de réaliser une analyse sur le capteur le plus mauvais.

L'analyse du « cas le plus défavorable » utilise uniquement les données du capteur avec un écart de la moyenne de la valeur de consigne le plus important. L'écart de la moyenne le plus important de ce capteur est ajouté au double de l'écart type de ses variations plus l'incertitude élargie composée de toutes les autres incertitudes. Cela conduit à un postula de la forme: aucun point du spécimen en essai ne se situait à l'extérieur de la plage « point de réglage $\pm$ une incertitude avec une confiance de 95 % ». Dans cet exemple, en utilisant les données des Tableaux A.1 et A.2, cela donne $40,0\text{ °C} \pm 1,08\text{ K}$ avec une confiance de 95 %. Pour la température il est souvent possible d'utiliser ce type d'analyse pour dire que l'essai était à l'intérieur des tolérances requises, c'est-à-dire $40,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ K}$, avec un niveau de confiance de 95 %. Pour l'humidité, il serait rarement possible de faire ce type de déclaration.

Peu importe l'approche utilisée, les données requises sont les mêmes et le processus de développement du budget d'incertitude peut être un indicateur vraiment utile pour les composantes majeures d'incertitude. Cela peut montrer que l'homogénéité en température dans les chambres d'essai, et que la commande cyclique qui apparaît souvent, sont les composantes principales d'incertitude. Pour l'humidité, l'homogénéité en température peut causer des modifications très importantes de l'humidité relative d'un point de l'espace à un autre de la chambre d'essais. Près de la condensation à 20 °C, une différence de température de 1 °C provoque une différence de 6 % de l'humidité relative. Effectivement cette incertitude seule est souvent si importante que les autres pourraient être ignorées.

Annex A (informative)

Ensembles de données de mesure – Chambre d'essais chargée

**Tableau A.1 – Ensemble type de données de mesure de la température
et ses analyses et références**

Temps	Mesures du capteur de température °C								A chaque mesure	
	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne	SD
09:48	39,15	39,90	39,62	40,06	39,36	40,31	40,53	39,68	39,825	0,469
09:49	39,13	39,86	39,60	39,98	39,30	40,21	40,43	39,66	39,771	0,441
09:50	39,13	39,86	39,56	40,00	39,28	40,23	40,47	39,66	39,773	0,460
09:51	39,13	39,84	39,58	39,96	39,28	40,19	40,37	39,64	39,748	0,429
09:52	39,05	39,74	39,50	39,86	39,20	40,10	40,27	39,60	39,664	0,419
09:53	39,19	39,86	39,64	40,02	39,36	40,23	40,37	39,66	39,790	0,411
09:54	39,15	39,82	39,62	39,96	39,32	40,17	40,31	39,66	39,751	0,400
09:55	39,17	39,86	39,62	40,02	39,32	40,25	40,47	39,68	39,798	0,445
09:56	39,13	39,80	39,56	39,94	39,28	40,19	40,41	39,66	39,746	0,436
09:57	39,17	39,82	39,58	39,94	39,28	40,21	40,45	39,68	39,766	0,438
09:58	39,19	39,82	39,58	39,98	39,32	40,23	40,47	39,70	39,786	0,437
09:59	39,15	39,84	39,62	39,98	39,32	40,21	40,39	39,70	39,776	0,423
10:00	39,17	39,86	39,64	40,00	39,36	40,25	40,47	39,72	39,808	0,436
10:01	39,17	39,86	39,64	40,00	39,36	40,23	40,41	39,72	39,798	0,420
10:02	39,19	39,86	39,62	39,98	39,36	40,23	40,45	39,74	39,803	0,424
10:03	39,19	39,86	39,62	40,00	39,36	40,21	40,39	39,74	39,795	0,409
10:04	39,28	39,94	39,70	40,12	39,44	40,35	40,55	39,80	39,897	0,434
10:05	39,24	39,86	39,66	39,98	39,38	40,21	40,43	39,76	39,815	0,398
10:06	39,23	39,86	39,66	40,00	39,36	40,17	40,37	39,74	39,798	0,389
10:07	39,28	39,94	39,70	40,08	39,42	40,29	40,49	39,78	39,872	0,414
10:08	39,28	39,92	39,68	40,04	39,38	40,25	40,45	39,78	39,848	0,404
10:09	39,21	39,86	39,62	39,96	39,34	40,17	40,39	39,72	39,783	0,400
10:10	39,13	39,78	39,58	39,86	39,28	40,10	40,33	39,70	39,718	0,397
10:11	39,19	39,82	39,62	39,94	39,32	40,17	40,37	39,72	39,768	0,401
10:12	39,21	39,88	39,66	40,04	39,38	40,25	40,49	39,76	39,833	0,429
10:13	39,19	39,86	39,64	40,00	39,36	40,21	40,45	39,78	39,810	0,420
10:14	39,21	39,88	39,66	40,02	39,38	40,23	40,45	39,78	39,825	0,416
10:15	39,19	39,86	39,64	39,98	39,38	40,19	40,39	39,76	39,798	0,401
10:16	39,19	39,86	39,66	40,00	39,38	40,21	40,41	39,76	39,808	0,408
10:17	39,21	39,86	39,66	40,02	39,38	40,21	40,39	39,78	39,813	0,400
Pour chaque capteur										
Moyenne	39,180	39,852	39,623	39,987	39,342	40,219	40,424	39,715		
SDs	0,052	0,041	0,044	0,053	0,049	0,052	0,061	0,051		
Moyenne globale									39,793	
SD globale									0,397	

**Tableau A.2 – Analyse des mesures de l'humidité basée sur les températures
du Tableau A.1**

Temps	Tempéra- ture de rosée	Mesurée % HR calculé à chaque capteur de température								A chaque mesure	
		1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne	SD
09:48	36,85	88,32	84,84	86,11	84,13	87,31	82,98	82,02	85,84	85,192	2,130
09:49	36,74	87,89	84,51	85,69	83,98	87,06	82,92	81,96	85,41	84,927	2,002
09:50	36,73	87,84	84,47	85,82	83,84	87,11	82,78	81,74	85,37	84,871	2,081
09:51	36,62	87,31	84,05	85,22	83,52	86,59	82,46	81,68	84,95	84,471	1,936
09:52	36,63	87,73	84,54	85,63	84,01	87,00	82,95	82,16	85,17	84,898	1,901
09:53	36,72	87,51	84,42	85,41	83,71	86,69	82,74	82,13	85,32	84,741	1,861
09:54	37,02	89,14	85,99	86,91	85,36	88,31	84,37	83,75	86,73	86,321	1,847
09:55	36,60	87,03	83,87	84,94	83,16	86,31	82,11	81,16	84,67	84,157	2,000
09:56	36,63	87,36	84,27	85,35	83,65	86,63	82,51	81,55	84,90	84,529	1,965
09:57	36,85	88,23	85,20	86,29	84,66	87,68	83,42	82,37	85,84	85,460	1,996
09:58	36,98	88,76	85,81	86,91	85,08	88,12	83,92	82,86	86,36	85,977	2,003
09:59	36,63	87,27	84,09	85,08	83,47	86,45	82,42	81,64	84,72	84,394	1,907
10:00	36,83	88,13	84,93	85,93	84,30	87,21	83,15	82,19	85,56	85,175	1,980
10:01	36,59	86,98	83,82	84,81	83,20	86,08	82,15	81,38	84,45	84,108	1,887
10:02	36,64	87,13	84,05	85,13	83,52	86,31	82,38	81,43	84,59	84,317	1,906
10:03	36,84	88,08	84,97	86,06	84,35	87,26	83,37	82,58	85,52	85,275	1,865
10:04	36,60	86,48	83,51	84,58	82,72	85,76	81,68	80,82	84,14	83,711	1,937
10:05	36,85	87,85	85,02	85,93	84,48	87,22	83,42	82,45	85,47	85,230	1,811
10:06	37,02	88,76	85,81	86,73	85,18	88,12	84,37	83,48	86,36	86,103	1,789
10:07	36,57	86,33	83,38	84,44	82,76	85,71	81,80	80,94	84,09	83,683	1,846
10:08	36,60	86,48	83,60	84,67	83,07	86,03	82,11	81,25	84,22	83,930	1,808
10:09	36,59	86,80	83,82	84,90	83,38	86,17	82,41	81,46	84,45	84,173	1,799
10:10	36,84	88,37	85,34	86,25	84,97	87,63	83,90	82,84	85,70	85,625	1,819
10:11	36,74	87,60	84,69	85,59	84,15	86,97	83,09	82,22	85,14	84,934	1,820
10:12	36,67	87,18	84,10	85,09	83,39	86,36	82,43	81,39	84,64	84,321	1,932
10:13	36,62	87,03	83,96	84,95	83,34	86,22	82,38	81,34	84,32	84,191	1,889
10:14	36,84	87,99	84,88	85,88	84,26	87,17	83,28	82,32	85,34	85,140	1,892
10:15	37,00	88,86	85,72	86,73	85,18	87,93	84,19	83,31	86,18	86,010	1,842
10:16	36,77	87,75	84,65	85,55	84,03	86,84	83,05	82,18	85,10	84,893	1,850
10:17	36,95	88,52	85,49	86,40	84,76	87,69	83,87	83,08	85,85	85,708	1,835
Pour chaque capteur											
Moyenne		87,690	84,594	85,632	83,987	86,931	82,954	82,056	85,212		
SDs		0,746	0,731	0,707	0,739	0,718	0,744	0,755	0,706		
										Moyenne globale	84,88
										SD globale	1,924

Bibliographie

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide sur l'expression de l'incertitude dans les mesures. Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse. ISBN 92-67-10188-9, Première Edition 1993, corrigée et réimprimée en 1995 (Equivalent BSI: BSI PD 6461: 1995, Vocabulaire de métrologie, Partie 3: Guide sur l'expression de l'incertitude dans les mesures BSI ISBN 0 580 23482 7).

BS 1339-1:2002 Humidité – Partie 1: Termes, définitions et formules.

BS 4833:1986 Inventaire des tableaux hygrométriques pour l'utilisation en essai et en fonctionnement des enceintes d'environnement

EA-4/02 Expression des incertitudes de mesure dans l'étalonnage, Décembre 1999, Coopération européenne pour l'accréditation des laboratoires, Rotterdam

EA-4/02-S1 Supplément au EA-4/02

Guide de bonne pratique de mesure No 11, Le Guide du débutant pour les incertitudes de mesure, Stephanie Bell, NPL, Londres, 1999

Guide de bonne pratique de mesure No 36, Incertitudes estimées en essai, Keith Birch, NPL, Londres, 2001

NIST Note Technique 1297, Edition 1994, « Lignes directrices pour l'évaluation et l'expression de l'incertitude des résultats de mesures NIST »

Pragnell R F, un tableur Excel contenant les formules hygrométriques couramment requises peut être téléchargé depuis le site Web SEE www.environmental.org.uk

Pragnell R F, Les relations entre les normes d'étalonnage d'humidité et celles pour les essais d'environnement, Ingénierie en environnement, Septembre 1988

UKAS publication M 3003 L'expression de l'incertitude et de la confiance dans la mesure Edition 1, Décembre 1997

UKAS publication Lab12 L'expression de l'incertitude en essai, Octobre 2000

ISBN 2-8318-9147-7



9 782831 891477

ICS 19.040

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND