

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



HORIZONTAL STANDARD

NORME HORIZONTALE

**Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings –
Part 1: Requirements for measuring instruments**

**Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et
électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans
leur rapport à l'exposition humaine –
Partie 1: Exigences applicables aux instruments de mesure**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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 Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de 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.

Liens utiles:

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

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



HORIZONTAL STANDARD

NORME HORIZONTALE

**Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings –
Part 1: Requirements for measuring instruments**

**Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine –
Partie 1: Exigences applicables aux instruments de mesure**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XA

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-8322-1298-1

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
3.1 Meters	7
3.2 Meter characteristics.....	8
3.3 Field characteristics	9
3.4 Measurements	10
4 Symbols	11
5 Instrumentation specifications	12
5.1 General.....	12
5.2 Measurement uncertainty.....	12
5.3 Magnitude range	13
5.4 Pass-band	13
5.5 Operating temperature and humidity ranges.....	13
5.6 Power supplies	13
5.7 Readability of scale.....	14
5.8 Instrument dimensions and choice of probe	14
5.8.1 General schema	14
5.8.2 Magnetic field meter	14
5.8.3 Electric field meter.....	15
5.8.4 Support for electric field meter.....	15
5.9 Electromagnetic compatibility.....	15
5.9.1 Immunity.....	15
5.9.2 Emissions	16
5.10 Crest factor	17
5.11 Durability	17
5.12 Weight	17
5.13 Instrumentation choice	18
6 Calibration.....	18
6.1 General.....	18
6.2 Calibration procedure.....	18
6.2.1 General	18
6.2.2 Magnetic field calibration system	18
6.2.3 Electric field calibration system.....	19
6.2.4 Three-axis probes calibration.....	19
6.2.5 Calibration values	19
6.2.6 Calibration uncertainty.....	20
6.3 Calibration documentation	20
7 Verification	21
Annex A (normative) Calibration methods	22
Annex B (informative) Example of calibration uncertainty.....	33
Annex C (informative) General characteristics of magnetic and electric fields	35
Annex D (informative) Magnetic flux density meters (magnetic field meters)	39

Annex E (informative) Electric field strength meters (electric field meters)	43
Annex F (informative) Influence of humidity on electric field measurement	47
Annex G (informative) Units	49
Bibliography	50
Figure 1 – Schema of a field meter	14
Figure 2 – Insulating tripod and offset rod for an electric field probe (photograph RTE)	15
Figure 3 – Electric field measurement using a hand-held stick (photograph RTE)	15
Figure A.1 – Deviation in percentage departure of calculated axial field [7]	22
Figure A.2 – Coordinate system and geometry of rectangular loop of many turns of wire (see Equation (A. 1))	23
Figure A.3 – Circular Helmholtz coils	24
Figure A.4 – Deviation in percentage of calculated B_z from centre value (see Equation (A.4))	25
Figure A.5 – Schematic view of a circuit for calibration of magnetic field meter using a square loop to produce a known field	25
Figure A.6 – Diagram for voltage injection technique	27
Figure A.7 – Calculated normalized electric field at plate surfaces and midway between plates as a function of the normalized distance from the edge of the plate	28
Figure A.8 – Parallel plates system for calibrating free-body electric field meters	30
Figure A.9 – Arrangement with parallel plates orientated perpendicular to the floor	31
Figure A.10 – Diagram for current injection technique	32
Figure C.1 – Oscillating and rotating field quantities for cases of elliptical polarization, linear polarization, and circular polarization	36
Figure C.2 – Magnetic field from current in straight and circular conductors	37
Figure C.3 – Perturbation of electric field distribution by a person (from IEC 62226-3-1)	38
Figure C.4 – Proximity effect with a 25 kV line and a building (from IEC 62110)	38
Figure D.1 – Schematic view of simple magnetic field meter with coil-type probe	39
Figure D.2 – Approximate equivalent circuit of a coil probe when connected to the detector	41
Figure E.1 – Single-axis free-body meter geometries	44
Figure E.2 – Designs for flat plate probes used with ground-referenced electric field meters	45
Figure F.1 – Test in the climatic chamber with the normal tripod (left) and the offset tripod (right) (photograph EDF R&D)	47
Figure F.2 – E field measured as a function of the humidity with a normal tripod	48
Figure F.3 – E field measured as a function of the humidity with an offset tripod	48
Table 1 – Mains terminal disturbance voltage limits for class B group 1 equipment measured on a test site	17
Table A.1 – Calculated normalized electric field values midway between plates and at plate surfaces	30
Table B.1 – Example of uncertainty calculation	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT OF DC MAGNETIC, AC MAGNETIC AND AC ELECTRIC FIELDS FROM 1 Hz TO 100 kHz WITH REGARD TO EXPOSURE OF HUMAN BEINGS –

Part 1: Requirements for measuring instruments

FOREWORD

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

International Standard IEC 61786-1 has been prepared by IEC technical committee 106: Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure.

The first editions of IEC 61786-1 and IEC 61786-2 replace IEC 61786:1998. Part 1 deals with measuring instruments, and Part 2 deals with measurement procedures. The content of the standard was revised in order to give up-to-date and practical information to the user.

It has the status of a horizontal standard in accordance with IEC Guide 108.

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

FDIS	Report on voting
106/292/FDIS	106/298/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 of the IEC 61786 series, published under the general title *Measurement of DC magnetic fields and AC magnetic and electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability 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.

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

MEASUREMENT OF DC MAGNETIC, AC MAGNETIC AND AC ELECTRIC FIELDS FROM 1 Hz TO 100 kHz WITH REGARD TO EXPOSURE OF HUMAN BEINGS –

Part 1: Requirements for measuring instruments

1 Scope

This part of IEC 61786 provides guidance for measuring instruments used to measure the field strength of quasi-static magnetic and electric fields that have a frequency content in the range 1 Hz to 100 kHz and with DC magnetic fields to evaluate the exposure levels of the human body to these fields.

Sources of fields include devices that operate at power frequencies and produce power frequency and power frequency harmonic fields, as well as devices that produce fields within the frequency range of this document, including devices that produce static fields, and the earth's static magnetic field. The magnitude ranges covered by this standard are 0,1 μ T to 200 mT in AC (1 μ T to 10 T in DC) and 1 V/m to 50 kV/m for magnetic fields and electric fields, respectively.

When measurements outside this range are performed, most of the provisions of this standard will still apply, but special attention should be paid to specified uncertainty and calibration procedures.

Specifically, this standard

- defines terminology;
- identifies requirements on field meter specifications;
- indicates methods of calibration;
- defines requirements on instrumentation uncertainty;
- describes general characteristics of fields;
- describes operational principles of instrumentation.

NOTE Measurement methods that achieve defined goals pertaining to assessment of human exposure are described in IEC 61786-2

Sources of uncertainty during calibration are also identified. In regard to electric field measurements, this standard considers only the measurement of the unperturbed electric field strength at a point in free space (i.e. the electric field prior to the introduction of the field meter and operator) or above conducting surfaces.

This horizontal standard is primarily intended for use by technical committees in the preparation of standards in accordance with the principles laid down in IEC Guide 108.

One of the responsibilities of a technical committee is, wherever applicable, to make use of horizontal standards in the preparation of its publications. The contents of this horizontal standard will not apply unless specifically referred to or included in the relevant publications.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For

undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 61000-3-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*

IEC 61000-4-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*

IEC 61000-4-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3 : Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*

IEC 61000-4-4, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test*

IEC 61000-4-6, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields*

IEC 61000-4-8, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-8: Testing and measurement techniques – Power frequency magnetic field immunity test*

CISPR 11, *Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*

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

Guide 108, *Guidelines for ensuring the coherency of IEC publications – Application of horizontal standards*

3 Terms and definitions

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

NOTE 1 Internationally accepted SI-units are used throughout the standard.

NOTE 2 For other units, see Annex G.

NOTE 3 Throughout this standard, the words "magnetic flux density" and "magnetic field" will be considered synonymous.

3.1 Meters

3.1.1

measuring instrument

device intended to be used to make measurements, alone or in conjunction with supplementary devices

[SOURCE: IEC 60050-300:2001, 311-03-01]

3.1.2

field meter

meter designed to measure electric, magnetic and electromagnetic fields

Note 1 to entry: Field meters usually consist of three parts: the probe, the detector circuit and the display.

3.1.3

probe

input device of a measuring instrument, generally made as a separate unit and connected to it by means of a flexible cable, which transmits the measurand in a suitable form

Note 1 to entry: A probe can be composed of one or several sensors.

[SOURCE: IEC 60050-300:2001, 313-09-11, modified – a note to entry has been added.]

3.1.4

detector

device for discerning the existence or variations of waves, oscillations or signals, usually for extracting information conveyed.

EXAMPLES Peak detector, rms detector

[SOURCE: IEC 60050-702:1992, 702-09-39, modified – the examples are different.]

3.1.5

free-body meter

meter that measures the unperturbed electric field strength at a point above the ground and is supported in space without conductive contact to ground

3.1.6

fluxgate magnetometer

instrument designed to measure magnetic fields by making use of the non-linear magnetic characteristics of a probe or sensing element that has a ferromagnetic core

3.1.7

ground reference meter

meter that measures the electric field at or close to the surface of the ground, frequently implemented by measuring the induced current or charge oscillating between an isolated electrode and ground.

Note 1 to entry: The isolated electrode is usually a plate located at ground level or slightly above the ground surface.

3.1.8

survey meter

lightweight battery-operated meter that gives a real time read-out and that can be held conveniently by hand in order to conduct survey type measurements in different locations

3.1.9

coil probe

magnetic flux density sensor comprised of a coil of wire that produces an induced voltage proportional to the time derivative of the magnetic field

3.1.10

Hall effect probe

magnetic flux density sensor containing an element exhibiting the Hall effect to produce a voltage proportional to the magnetic flux density

3.2 Meter characteristics

3.2.1

crest factor

ratio of the maximum absolute value of an alternating quantity to its root-mean-square value

[SOURCE: IEC 60050-103:2009, 103-14-57, modified – the original term was "peak factor" and the note has been deleted.]

3.2.2**crosstalk**

the appearance of undesired energy in a channel, owing to the presence of a signal in another channel, caused by, for example induction, conduction or non-linearity

[SOURCE: IEC 60050-722:1992, 722-15-03]

3.2.3**frequency response**

for a linear time-invariant system with a sinusoidal input variable in steady state the ratio of the phasor of the output variable to the phasor of the corresponding input variable, represented as a function of the angular frequency ω

[SOURCE: IEC 60050-351:2006, 351-24-33, modified – the note in the original has been deleted.]

3.2.4**isotropy of the probe**

a measure of the degree to which the response of a field probe is independent of the polarization and direction of propagation of the incident field

3.2.5**pass-band**

frequency band throughout which the attenuation is less than a specified value

[SOURCE: IEC 60050-151:2001, 151-13-52]

3.2.6**root-mean-square value****rms value**

1) for n quantities $x_1, x_2, \dots, x_n$, positive square root of the mean value of their squares:

$$X_q = \left[\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

2) for a quantity x depending of a variable t , positive square root of the mean value of the square of the quantity taken over a given interval $[t_0, t_0+T]$ of the variable

$$X_q = \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t)]^2 dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

Note 1 to entry: The rms value of a periodic quantity is usually taken over an integration interval the range of which is the period multiplied by a natural number

[SOURCE: IEC 60050-103:2009, 103-02-02, modified – the second note in the original definition has been deleted.]

3.3 Field characteristics**3.3.1****unperturbed field**

field at a point that would exist in the absence of persons or movable objects

3.3.2

nearly uniform field

field in area where the resultant field over the cross-sectional area of the probe does not change more than 1%

3.3.3

quasi-static field

field that satisfies the condition $f \ll \frac{c}{l}$ (i.e. wavelength $\gg l$), where f is the frequency of the field, c is the speed of light, and l is a characteristic dimension of the measurement geometry, e.g. the distance between the field source and the measurement point

Note 1 to entry: Power frequency magnetic and electric fields near power lines and appliances are examples of quasi-static fields.

3.3.4

resultant field

field given by the expression

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3)$$

where F_x , F_y , and F_z are the rms values of the three orthogonal field components,

or by the expression

$$F_R = \sqrt{F_{\max}^2 + F_{\min}^2} \quad (4)$$

where $F_{\max}$ and $F_{\min}$ are the rms values of the semi-major and semi-minor axes of the field ellipse, respectively.

Note 1 to entry: The resultant F_R is always $\geq F_{\max}$. If the field is linearly polarized, $F_{\min} = 0$ and $F_R = F_{\max}$. If the field is circularly polarized, $F_{\max} = F_{\min}$ and $F_R \approx 1,41 F_{\max}$.

3.4 Measurements

3.4.1

correction factor

numerical factor by which the uncorrected result of a measurement is multiplied to compensate for a known error

Note 1 to entry: Since the known error cannot be determined perfectly, the compensation cannot be complete.

3.4.2

coverage factor

numerical factor used as a multiplier of the combined standard uncertainty in order to obtain an expanded uncertainty

Note 1 to entry: For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_z and standard deviation σ , the interval $\mu_z \pm k\sigma$ encompasses 68,27 %, 95,45 % and 99,73 % of the distribution for a coverage factor $k = 1, 2$ and 3, respectively.

3.4.3

scale factor

factor by which the instrument reading is multiplied to obtain its input quantity

3.4.4

standard uncertainty

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

3.4.5**uncertainty of calibration**

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

Note 1 to entry: Uncertainty of calibration generally comprises many components. Some of these components may be estimated on the basis of the statistical distribution of the results of series of measurements, and can be characterized by experimental standard deviations. Estimates of other components can be based on experience or other information.

4 Symbols

a	= radius of coil probe; radius of spherical electric field probe
$2a, 2b$	= side dimensions of rectangular coil
$\mathbf{B}$	= magnetic flux density vector
B_0	= amplitude of alternating magnetic field
B_R	= resultant magnetic field
B_z	= axial magnetic flux density
C	= stray capacitance of coil probe
d	= spacing of parallel plates; distance from electromagnetic field source; spacing of Helmholtz coils
$\mathbf{D}$	= electric displacement vector
E	= electric field strength
E_0	= uniform electric field strength
$F_{\max}, F_{\min}$	= rms values of semi-major and semi-minor axes of field ellipse
I	= current to magnetic field coils
L	= inductance of coil probe
N	= number of turns of wire (magnetic field coil system)
Q	= induced charge
r	= distance between magnetic field source and measurement location; resistance of coil probe and leads
R	= approximate input impedance of detector circuit (magnetic field meter); radius of Helmholtz coils
S	= electrode surface area (electric field meter)
t	= time
T	= period of periodic signal
V	= voltage
Z	= impedance in current injection circuit
λ	= wave length
ϵ_0	= permittivity of free space
μ_0	= permeability of free space
φ	= magnetic flux
ω	= angular frequency of alternating field

5 Instrumentation specifications

5.1 General

When measuring field in the context of assessment of human exposure, the following items are considered below:

- measurement of the resultant field strength;
- measurement of the unperturbed electric field.

NOTE 1 Other items may be required depending on the goal of the measurement.

The various types of instrumentation available for characterizing quasi-static magnetic fields are described in Clause D.1.

The various types of instrumentation available for characterizing static magnetic fields are described in Clause D.3

Several types of magnetic field meters are in common use, e.g. field meters with coil probes, meters with Hall-effect probes, and meters that combine two coils with a ferromagnetic core as in a fluxgate magnetometer.

NOTE 2 Hall effect probes respond to static as well as time-varying magnetic flux densities. Due to limited sensitivity and saturation problems sometimes encountered when attempting to measure small power frequency flux densities in the presence of the substantial static geomagnetic flux of the earth, Hall-effect probes have seldom been used to measure magnetic fields of a.c. power lines.

The various types of instrumentation available for characterizing quasi-static electric fields are described in Clause E.1. The following two types of electric field meters are considered in this standard:

- a) the free-body meter;
- b) the ground reference meter.

Sufficient information shall be provided with the instrumentation, including instrument specifications and a clearly written instruction manual, to enable users to determine compliance with this standard, to aid them in the proper operation of the field meter, and to assess the usefulness of the device for the user's application. The instrument specifications that shall be provided and/or satisfied are given below.

5.2 Measurement uncertainty

The measurement uncertainty of the measuring instrument shall be specified by the manufacturer of the instrument. The measurement uncertainty shall be determined following the ISO/IEC Guide 98-3. The uncertainty shall be specified as an extended measurement uncertainty using a coverage factor of 2. The uncertainty is valid after available correction factors are applied. The uncertainty shall contain all components which are relevant when the instrument is used in a nearly uniform field. Such components may be calibration uncertainty, frequency response, deviations of the gain in different measurement range settings, isotropy of the probe, internal noise sources, non-linearity, stability, temperature response and humidity response. The uncertainty of the instrument does not include effects due to the handling of the instrument like positioning the probe in a non-uniform field or the influence of the measuring person on the field to be measured. Such components must be taken into account as additional uncertainties in the measurement report.

NOTE 1 At power frequency, the uncertainty of measuring instrument is usually 10 % or better.

NOTE 2 Examples of guidelines on the treatment of calibration uncertainties are given in Annex B.

5.3 Magnitude range

The magnitude range over which the instrument operates within the specified uncertainty shall be clearly indicated.

5.4 Pass-band

Broadband measuring instruments in the AC range always have a lower and an upper cut off frequency, which define a pass band. Normally the pass band limits are defined by the minus 3 dB point of the frequency response. The nominal frequency response of an instrument can be described as the frequency response of a system with a high pass filter and a low pass filter connected in series. The filter types and the filter orders should be specified (e.g. 3rd order Butterworth high pass and 5th order Butterworth low pass). The nominal frequency response of the instrument is normally not treated as a source of measurement uncertainty because the band limiting effect of the filters is a desired property of the instrument if broadband measurements are made. In frequency selective measurements (e.g. FFT) the band limiting effect of the filters is not desired and the nominal frequency response should be automatically corrected. The measurement uncertainty of an instrument due to manufacturing tolerances is normally greater at the band limits compared to medium frequencies. Therefore the measurement uncertainty of an instrument is often specified also and sometimes only in a restricted frequency range. This range is not as broad as the pass band but should be still broad enough to cover all frequencies of interest. In the restricted frequency range the influence of the nominal frequency response shall be negligible.

5.5 Operating temperature and humidity ranges

The temperature and relative humidity ranges over which the instrument operates within the specified uncertainty shall be at least -10 °C to 45 °C and 5 % to 95 %, respectively. Sudden temperature changes that can lead to condensation in the instrument should be avoided.

Electric field measurement may be perturbed if the relative humidity is more than 70 % due to condensation effect on the probe and support [2] ¹. Since the effect of humidity depends on the field meter, the ability of the field meter to work correctly under those conditions should be checked before measurement (see Annex F).

5.6 Power supplies

The use of measurement equipment that is operating on internal battery power is recommended.

If batteries are used, provision should be made to indicate whether the battery condition is adequate for proper operation of the field meter. Instruments used to record personal exposure should be capable of at least 8 h operation within their rated uncertainty before replacement or recharging of the batteries becomes necessary.

If rechargeable batteries are used it is recommended that the instrumentation is not operated while connected to the charging station. When such connections are necessary, it should be demonstrated that stray fields from the battery charger, conducted disturbances from the mains voltage and electromagnetic coupling via the connecting leads (to the battery charger) do not affect the measurement (see 5.9).

There shall be no wire connections to electric field free-body meters.

If batteries with ferromagnetic jackets are used in exposure meters, care must be exercised that the jackets do not significantly influence readings by the instrument (see IEC 61786-2 for more details about source of measurement uncertainty).

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

5.7 Readability of scale

The display of the meter, if applicable, should be digital.

Remote displays shall be used to avoid perturbation of the electric field by the observer.

The meter digital displays of magnetic field survey meters should be large enough to be easily read at arm's length. If more than one range of sensitivity is provided, the full scale value of the selected range should be indicated, and the units should be readily interpretable. For auto-ranging instrumentation, the magnitude range may be indicated elsewhere, e.g. in the user manual. The instrumentation should provide a clear indication of the units being displayed.

5.8 Instrument dimensions and choice of probe

5.8.1 General schema

A general schema of a meter is given in Figure 1.

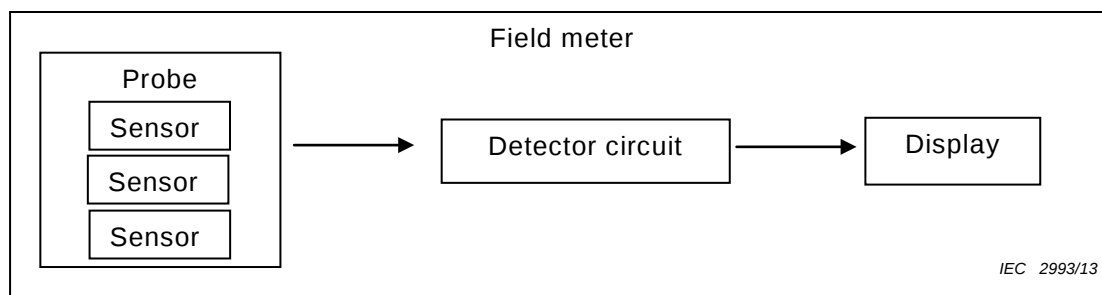


Figure 1 – Schema of a field meter

The probes should be three-axis.

NOTE Single-axis probes can be used to measure the rms values of the semi-major axes of the field ellipse by orienting the probe until a maximum reading is obtained. Single-axis meters can also be used to determine the resultant magnetic field by measuring the rms values of three orthogonal spatial components and combining them according to Equation (3). It is assumed that during this procedure there are no significant changes in the rms values of the spatial components. Single axis use is suitable for electric field measurement referenced to conducting surface.

5.8.2 Magnetic field meter

The dimensions of the meter should be provided.

The size of the probe should be appropriate to the spatial variation of the field measured. The probe shall be of area 0,01 m², or smaller. With three-axis probes, the three sensors may be concentric or, if the sensors are no larger than 0,05 m, they should be as close together as possible. The maximum dimension of the space containing the three sensors combined shall not exceed 0,2 m.

Coil probes should be either circular or square in cross-section; small deviations from these shapes, for example where concentric coils cross each other, are permitted.

Since the induced voltage is proportional to the time derivative of the magnetic flux density, the detector circuit requires an integrating stage to recover the waveform of the magnetic flux density.

The locations and orientations of the sensors that are contained within the housings of magnetic field meters shall be clearly indicated on the instrument or in the instruction manual.

5.8.3 Electric field meter

The dimensions for electric field meters should be given in the manufacturer documentation according to meter type:

- a) free-body meter: the maximum probe dimensions of the volume containing probe shall not exceed 0,2 m;
- b) ground reference meter: probe dimensions and length of connecting coaxial cable.

5.8.4 Support for electric field meter

The support for electric field meter shall be made of insulating material, such as synthetic or composite material.

The dimension of the support depends on how the probe is supported:

- probe supported by a insulating tripod = 1m (Figure 2);
- probe supported by a standing man holding a hand-held stick = 2m (Figure 3).



IEC 2994/13

Figure 2 – Insulating tripod and offset rod for an electric field probe (photograph RTE)



IEC 2995/13

Figure 3 – Electric field measurement using a hand-held stick (photograph RTE)

5.9 Electromagnetic compatibility

5.9.1 Immunity

- a) Power frequency electric field

Instrumentation intended for use in the vicinity of high-voltage equipment operating at power frequencies shall not be affected significantly by ambient electric fields as large as 20 kV/m, i.e. the influence of the electric field on the magnetic field reading shall be less than 0,2 μ T. This immunity requirement may need to be increased for some extreme environments where electric fields as large as 100 kV/m may exist, e.g. near high-voltage transmission line conductors.

Tests for immunity to power frequency electric fields may be performed using the parallel plates systems described in Clause A.2.

NOTE 1 The proximity effect of the instrument user can shield or enhance the electric field, depending on the geometry of the field and the location of the magnetic field meter relative to the user. For influence of user during electric field test, see IEC 61786-2

b) Power frequency magnetic field

Instrumentation intended for use in the vicinity of high-voltage equipment operating at power frequencies shall not be affected significantly by ambient magnetic fields as large as 1 mT, i.e. the influence of the magnetic field on the electric field reading shall be less than 10 V/m. Instrumentation shall be tested in accordance with the methods described in IEC 61000-4-8.

Tests for immunity to power frequency magnetic fields may be performed using the coil systems described in Clause A.1.

c) Radiated electromagnetic fields

The operation of instrumentation shall not be affected by electromagnetic radiation for frequencies defined in IEC 61000-4-3 for an electric field of 3 V/m rms for frequencies between 80 MHz and 2 GHz, and 1 V/m rms for higher frequencies.

Testing of instrumentation shall be in accord with the methods described in IEC 61000-4-3.

NOTE 2 In IEC 61000-4-3:2006+A2:2010 the frequency range is 80 MHz-6 GHz, intended to cover radiofrequency applications as broadcasting, radiocommunication, GSM, Wifi, etc.

The operation of instrumentation shall not be affected by electromagnetic radiation between 150 kHz and 80 MHz. Tests shall be conducted according to the methods described in IEC 61000-4-6 at a voltage level of 3 V rms. The instrumentation shall continue to operate normally during both of the above tests.

Battery-powered equipment (dimension $< \lambda/4$) which has no connection(s) to the ground nor to any other (non-insulated) equipment, and which will not be used during battery charging, does not need to be tested according to IEC 61000-4-6.

NOTE 3 The immunity requirements may need to be increased under certain conditions, e.g. during measurements near radio-broadcasting antennas and mobile telephones.

d) Immunity to transients

Specifications for instrumentation connected to the mains in order to carry out measurements shall also be tested at the a.c. power port (interface of field meter with external power source or AC wall outlet) for compliance with IEC 61000-4-4 (electrical fast transient) for a peak voltage of 2 kV. A temporary degradation of performance during the test which is self-recoverable is acceptable.

e) Electrostatic discharge (ESD)

During most measurement applications, electrostatic discharges to or from the instrumentation are not anticipated. However, the connectors of the instrumentation shall be immune to a contact or discharge voltage of at least 2 kV and tested in accordance with the methods described in IEC 61000-4-2. No degradation of performance shall occur.

5.9.2 Emissions

a) Harmonic emissions

The harmonic emissions of instrumentation with a power rating of 50 W or greater shall be restricted according to the requirements of IEC 61000-3-2 class A.

NOTE Battery operated equipment is considered to meet the requirements.

- b) Conducted disturbances – 0,15 MHz to 30 MHz (instrumentation connected to AC power supply)

The conducted disturbances shall be less than the limits defined in Table 1 as a function of frequency (see CISPR 11, Table 3.).

Table 1 – Mains terminal disturbance voltage limits for class B group 1 equipment measured on a test site

Frequency band MHz	Quasi-peak dB(μV)	Average dB(μV)
0,15 – 0,50	66 Decreasing linearly with logarithm of frequency to 56	56 Decreasing linearly with logarithm of frequency to 46
0,50 – 5	56	46
5 – 30	60	50
At the transition frequency, the more stringent limit shall apply		

Testing of instrumentation shall be in accordance with the methods described in CISPR 11.

- c) Radiated disturbances – 30 MHz to 1 000 MHz

The electromagnetic emissions from instrumentation containing devices operating at frequencies of 9 kHz or higher shall be limited to the values listed below (see CISPR 11, Table 5, electromagnetic radiation disturbance limits for class B group 1 equipment measured on a test site at 10 m).

Quasi-peak: 30 dB (μV/m) at 10 m (30 MHz to 230 MHz)

Quasi-peak: 37 dB (μV/m) at 10 m (230 MHz to 1 000 MHz)

Testing of instrumentation shall be in accordance with the methods described in CISPR 11.

5.10 Crest factor

The measuring system shall measure correctly the true rms value of the field, even when the crest factor of the magnetic field is 3.

NOTE Many practical fields exhibit a large crest factor and the presence of a large crest factor may lead to unwanted saturation in the amplifier stages of the detector.

5.11 Durability

The indicating meter and other system components shall be rugged enough to withstand vibration and shock resulting from transport. A carrying case is desirable. The instrumentation shall be compliant with IEC 60721-3: storage class 1M2, transport class 2M3 and operation class 7M3.

5.12 Weight

The weight of the instrumentation should be provided. The weight of portable instrumentation should be kept as low as is practical to permit hand-held operation under restrictive conditions, e.g. in some industrial environments.

The weight of free-body electric field meters should be kept as low as is practical so that it can be held conveniently by hand with an insulating perch as long as 2 m.

5.13 Instrumentation choice

The choice of the measuring instrument should be made as a function of measurement procedures, especially concerning the need of information in the measurement report

Appropriate measuring instrument should be chosen in function of the field characteristics.

6 Calibration

6.1 General

Measurement systems are required to undergo calibration throughout their service life. All calibrations shall be traceable to national and international standards through an unbroken chain of calibrations, all having stated uncertainties.

The following three methods of magnetic field calibration are covered by this standard:

- a) calibration by introduction of the field meter probe into a calculable magnetic field (following measurements of coil dimensions and current to the coil system);
- b) calibration using a voltage injection technique;
- c) calibration by comparison with a reference measurement system.

The first method is the most used and is detailed in 6.2.2. The other two methods are detailed in Annex A.

The following method of electric field calibration is covered by this standard:

- calibration by introduction of the field meter probe into a calculable electric field (parallel plates system).

6.2 Calibration procedure

6.2.1 General

The procedures of this section should be followed, as appropriate, in all cases.

Calibration shall be performed at regular intervals. The initial interval should be of twelve months. This interval may be altered depending on the drift of the field meter response between calibrations and also depending on the conditions of use.

6.2.2 Magnetic field calibration system

For calibration of the higher magnitude ranges (i.e. ranges not significantly influenced by background magnetic fields), the magnetic field probe shall be placed in a nearly uniform field produced by a coil system (see Clause A.1). Each sensor axis, in turn, shall coincide with the axis of the coil system and the largest departure of the field from the central value shall be less than 1 % over the cross-sectional area of the probe.

Information on fields generated by rectangular, square, and circular loop systems (including Helmholtz coils) is given in [7], [18], [28], [34] and A.1. For example, the magnetic flux density produced by a single square loop (of many turns of wire) 1 m × 1 m will satisfy the uniformity requirement for a probe with a 0,10 m diameter (see Clause A.1). The loop size may be scaled upwards or downwards for larger or smaller probes, respectively, to maintain the indicated level of uniformity across the probe. The calibration may also be performed using the voltage injection technique or by comparison with a reference magnetic field meter (see Clause A.1).

The field uniformity requirement during calibration may be relaxed for large probes that are used for determining average values of non-uniform fields and, or for applications where spatial resolution requirements are not considered important. In this case, the largest departure of the calibration field from the central value should be $\leq 1,5$ % over the cross-sectional area of the probe. For example, the field produced by a square loop $1,3 \text{ m} \times 1,3 \text{ m}$ will satisfy this uniformity requirement for a probe with a $0,20 \text{ m}$ diameter.

Calibrations of each axis of three-axis field meters shall be performed with sinusoidal magnetic fields or their equivalent voltages (voltage injection technique) at the levels and frequencies indicated by the instrument specifications. The current to the calibration coils shall be nearly free (total harmonic distortion < 1 %) of harmonic content.

6.2.3 Electric field calibration system

During calibration, the field meter probe shall be placed in a nearly uniform field produced with parallel plates according to meter type, as described in Clause A.2. The departure of the field at the centre of the parallel plates from the uniform field value, i.e. the field produced by infinite parallel plates, shall be less than 1 % (see Clause A.2). The parallel plate spacing shall be sufficient to avoid proximity effects when the field meter probe is introduced between the plates (see Clause A.2). For example, free-body meters with no diagonal dimension greater than $0,23 \text{ m}$ may be calibrated at the centre of parallel plates $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$ spacing. The parallel plate dimensions may be scaled upward or downward for larger or smaller free-body meters. Each sensor axis, in turn, shall coincide with the direction of the electric field.

NOTE It is possible to calibrate the probe fixed on the support usually used for measurements, but not on the 3 axes of the probe (in this case, the dimension on the plates needs to be 2 m high and horizontal) – the other solution is to calibrate the probe alone on the 3 axes

Calibration of single-axis field meters and each axis of the three-axis field meters shall be performed with sinusoidal electric fields at the levels and frequencies indicated by the instrument specifications.

Energizing power supplies for the parallel-plates should provide voltages which are nearly free (total harmonic distortion ≤ 2 %) of harmonic content. Where this is not possible, the harmonic content should be recorded and it should be demonstrated that the harmonic content makes a negligible difference to the results of the calibration.

6.2.4 Three-axis probes calibration

When calibrating each axis of three-axis probes, checks for the isotropy of the probes as well as for crosstalk between the detector circuitry for each sensor shall be made. The three-axis probe and field should be configured so that the axis of each sensor can be aligned with the field direction in succession. For each alignment of the sensor, the output from the remaining two sensors should be measured and should be less than 3 % of the signal from the aligned sensor.

NOTE 1 The calibration of field meters with three-axis probes can also be checked for one orientation (at one frequency and field level) where approximately the same flux passes through all the coils.

NOTE 2 For three-axis instrumentations which are only giving the resultant of the field, this can be achieved by putting the instrument along the three axes and checking the resultant output.

6.2.5 Calibration values

At least three field levels for each measurement range of the field meter, between 30 % to 90 % of the full scale, should be recorded for meters with analogue displays. At least one point, between 10 % to 90 % of the full scale, should be obtained with field meters with digital displays.

For testing the different measurements ranges, the injection method may be needed.

Field meters with auto-ranging capabilities should be calibrated on each range at no less than one representative points inside the range.

For one field level, calibrations should be performed at three frequencies which span the pass-band, i.e. at the highest and lowest frequencies, and one intermediate frequency.

During calibration, the signal to noise ratio shall be high enough. If not, this shall be taken into account in the calibration uncertainty.

The resonant frequency of the calibration loop should be substantially greater than the calibration frequencies so that calibrations are not affected by the resonance phenomenon (see Clause A.1).

Perturbations of the calibration field due to image currents in nearby ground planes and proximity effects of ferromagnetic materials shall be made negligible (see Clause A.1).

6.2.6 Calibration uncertainty

The calibration uncertainty shall be determined following the ISO/IEC Guide 98-3.

The field in the calibration system shall be known with an uncertainty of less than ± 3 % (coverage factor 1).

For a magnetic field, the magnitude may be determined by calculation based on measurements of the coil dimensions, the number of turns in the coil(s) and the current in the coils (see Clause A.1), or by direct measurement with a calibrated reference magnetic flux density meter with sufficiently low measurement uncertainty. If the voltage injection technique is used as part of the calibration (see Clause A.1), the equivalent magnetic flux density is determined by the injected voltage.

For an electric field, the magnitude may be determined by calculation based on measurements of the parallel plate spacing and voltage (see Clause A.2), or by direct measurement with a calibrated reference electric field strength meter with a sufficiently low measurement uncertainty.

The uncertainty of the calibration will be determined by such factors as the uncertainty in the value of the field value in the calibration system (± 3 %) or the uncertainty in the injected voltage, the resolution in the reading of the instrument under test, and the variation of the reading if the instrument under test is repeatedly placed into the calibration system. Other factors such as ambient background magnetic fields may further compromise the uncertainty of the calibration. The overall uncertainty of the calibration process (coverage factor 1) shall be no greater than $\pm (5 \% + 10 \text{ nT or } 1 \text{ V/m})$. A coverage factor of 2 shall be used when specifying expanded measurement uncertainty, i.e. the expanded measurement uncertainty would be in this case $\leq \pm (10 \% + 20 \text{ nT or } 2 \text{ V/m})$. The calibration shall be traceable to national and/or international standards. Guidelines on the treatment of all uncertainties and a listing of the sources of uncertainty are given in 5.2 and an example is given in Annex B, respectively.

6.3 Calibration documentation

The following items should be addressed when preparing the calibration certificate, in addition to the data for the instrument specifications (see 5.2 to 5.12). Each calibration certificate shall include at least the following information, unless the laboratory has valid reasons for not doing so:

- a title (e.g. "Calibration Certificate");
- the name and address of the laboratory, and the location where the calibrations were carried out, if different from the address of the laboratory;

- unique identification of the calibration certificate (such as the serial number), and on each page an identification in order to ensure that the page is recognized as a part of the calibration certificate and a clear identification of the end of the certificate;
- the name and address of the client;
- identification of the method or standard used;
- a description of, the condition of, and unambiguous identification of the item(s) calibrated;
- the date of receipt of the calibration item(s) where this is critical to the validity and application of the results, and the date(s) of performance of the calibration.
- reference to the procedures used by the laboratory where these are relevant to the validity or application of the results.
- the calibration results with, where appropriate, the units of measurement;
- the name(s), function(s) and signature(s) or equivalent identification of person(s) authorizing the calibration certificate.

Instrument manufacturers should also document their calibration procedures, indicating all of the following information as may be applicable:

- magnetic field coil geometry and dimensions;
- resonance frequency of coil system;
- instrumentation for measurement of current to coil system; instrumental uncertainty; date of last calibration;
- instrumentation used for voltage measurement (voltage injection technique, see Clause A.1); instrumental uncertainty; date of last calibration;
- voltage divider ratio (voltage injection technique, see Clause A.1); dependence of ratio on frequency; uncertainty in ratio value;
- parallel plate dimensions and separation;
- instrumentation for the measurement of voltage to parallel plates; instrumental uncertainty; date of last calibration;
- uncertainty of reference measurement system; probe dimensions; pass-band; date of last calibration.

This information should be made available to clients upon request. Testing laboratories should also comply with the above requirements, as applicable.

Note Further guidelines on the calibration certificate can be found in 5.10 of ISO/IEC 17025:2005 [36].

7 Verification

The verification is a simple procedure to check the functionality of the field meter that should be done before using the meter. It includes:

- state of the battery;
- required accessories;
- visual inspection;
- calibration date.

Annex A (normative)

Calibration methods

A.1 Calibration of magnetic flux density meters

A.1.1 Using magnetic field generation

Calibration of a magnetic field meter is normally done by introducing the probe into a nearly uniform magnetic field of known magnitude and direction. Known magnetic fields may be produced using coil systems with circular and rectangular geometries [1], [7], [18], [25], [34]. For example, Helmholtz coils have frequently been employed to generate such fields. Comparison of field uniformity for fields produced by single square and circular coils, and square and circular Helmholtz coils are shown in Figure A.1 [7]. Figure A.1 shows the deviation of the axial magnetic field, in percentage, as a function of normalized distance from the axis of each coil system, where the distance is along a Cartesian coordinate (see Figure A.2 for the case of the single square loop). The distance is given as a percentage of the radius for the circular coils and as a percentage of half the side dimension for the square coils.

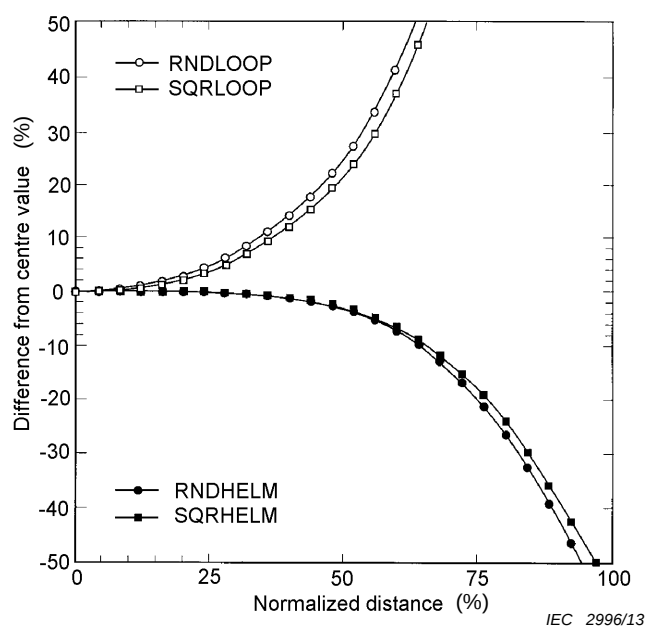


Figure A.1 – Deviation in percentage departure of calculated axial field [7]

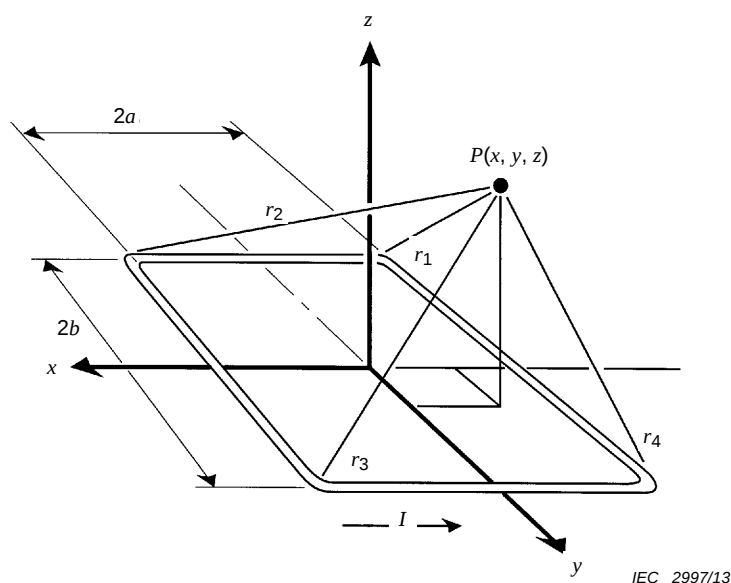


Figure A.2 – Coordinate system and geometry of rectangular loop of many turns of wire (see Equation (A. 1))

A single loop of many turns of wire with rectangular geometry used to produce the field is described below because the equations for calculating the field at all points in space are in closed form [19],[34] and the coil system is simple to construct. The simplicity of construction is at the expense of reduced field uniformity, but a sufficient uniformity for calibration purposes is readily obtained.

The z-component of the magnetic flux density, produced by a rectangular loop $2a \times 2b$ at a point in space $P(x,y,z)$, is given by the expression [19],[34]

$$B_z = \frac{\mu_0 I N}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} - \frac{C_\alpha}{r_\alpha (r_\alpha + d_\alpha)} \right] \quad (\text{A.1})$$

where

N is the number of turns;

$$C_1 = -C_4 = a + x;$$

$$C_2 = -C_3 = a - x;$$

$$d_1 = d_2 = b + y;$$

$$d_3 = d_4 = y - b;$$

$$r_1 = [(a + x)^2 + (b + y)^2 + z^2]^{1/2};$$

$$r_2 = [(a - x)^2 + (b + y)^2 + z^2]^{1/2};$$

$$r_3 = [(a - x)^2 + (b - y)^2 + z^2]^{1/2};$$

$$r_4 = [(a + x)^2 + (b - y)^2 + z^2]^{1/2};$$

I is the rms current in amperes;

μ_0 is the permeability of the air;

x , y , and z are the coordinates shown in Figure A.2.

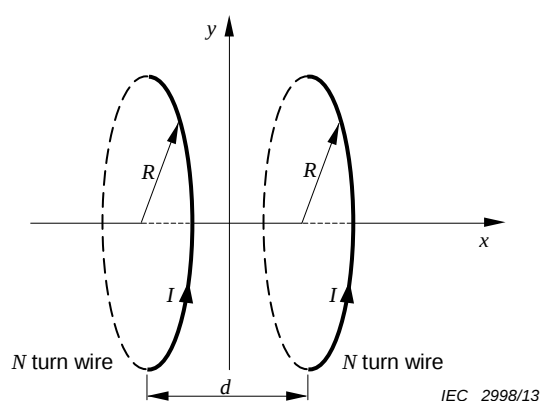


Figure A.3 – Circular Helmholtz coils

The magnetic field on the axis of circular Helmholtz coils of radius R is given by

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \left(1 + \frac{\left(x + \frac{d}{2} \right)^2}{R^2} \right)^{-\frac{3}{2}} + \frac{\mu_0 NI}{2R} \left(1 + \frac{\left(x - \frac{d}{2} \right)^2}{R^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \quad (\text{A.2})$$

N = number of turn

I = current

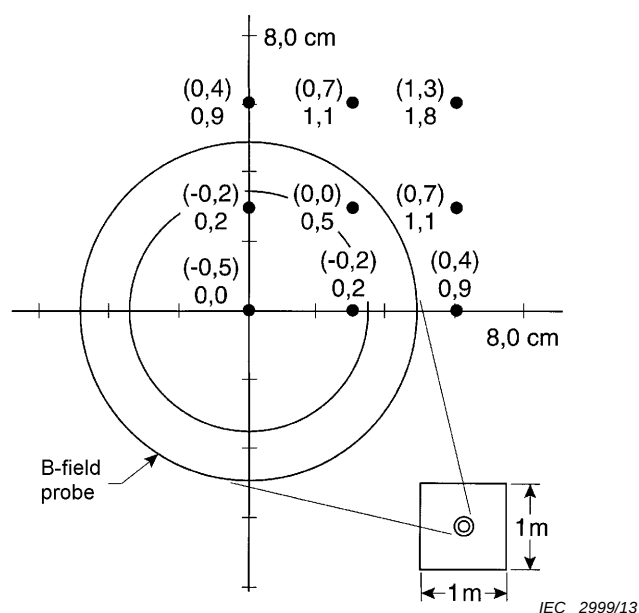
For $R = d$ and $x = 0$,

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{5^{\frac{3}{2}} R} \quad (\text{A.3})$$

The derivation of Equation (A.1) assumes that the conductors in the current loop have negligible cross-sections. It is noted for reference purposes that

$$B_z = \frac{\mu_0 IN\sqrt{2}}{\pi a} \quad (\text{A.4})$$

at the centre of a square loop of side dimension $2a$. Equation (A.1) has been used to calculate the field values at and near the centre of a square loop of dimensions $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. The percentage departure from the central magnetic field value at nearby points in the plane of the loop and at $0,03 \text{ m}$ above and below the plane of the loop (in parentheses) are plotted in Figure A.4. Also shown in Figure A.4 is a scale drawing of a magnetic field probe $0,10 \text{ m}$ in diameter. The departure of the magnetic field from the central value over the cross-sectional area of the $0,10 \text{ m}$ probe is less than 1% . Figure A.5 shows a schematic view of the probe, square calibration loop, and associated circuit for energizing the coils.



A scale drawing of a coil-type probe of 0,10 m in diameter is outlined.

Figure A.4 – Deviation in percentage of calculated B_z from centre value (see Equation (A.4))

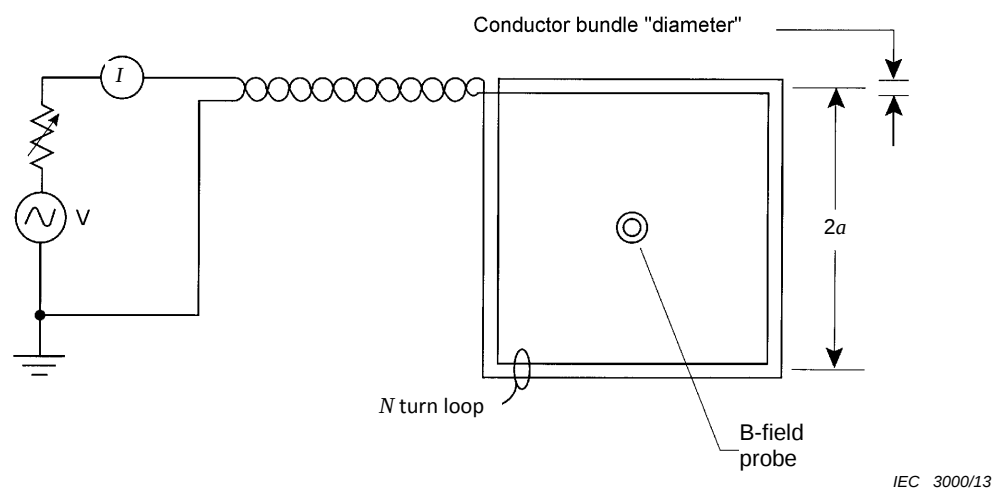


Figure A.5 – Schematic view of a circuit for calibration of magnetic field meter using a square loop to produce a known field

NOTE The uncertainty (coverage factor 1) in the value of the calibration field is determined by the uncertainties associated with calculating B_z . For example, in the case of a 1 m × 1 m square loop (see figures A.4 and A.5), the uncertainty is due to uncertainties in the measured current I , the side dimension of the loop, and the effect of non-uniformity of the magnetic field (< 0,5 % for a 0,10 m diameter probe). The uncertainty in the side dimension of the square loop can be due to a non-negligible conductor bundle cross-section. The side dimension may be taken to be the distance between the centres of the conductor bundles with an uncertainty equal to $\pm$ the conductor bundle "diameter" (see Figure A.5). The combined uncertainty in the value of the magnetic flux density is given by the square root of the sum-of-the-squares. If, for example, uncertainties in the determination of I and side dimension are $\pm 0,2$ % and $\pm 1,0$ %, respectively, the combined uncertainty in the value of the calibration field for the 0,10 m diameter probe is $\pm [(0,2)^2 + (1,0)^2 + (0,5)^2]^{1/2}$ or $\pm 1,1$ % (coverage factor 1).

It is noteworthy that a field meter with a coil probe will indicate a magnetic field value that is an average over the cross-sectional area of the probe. The difference between this average and the central value [see Equation (A.4)] will be less than the maximum percentage departure from the central value. For example, while the largest departure of the magnetic

field from the central value is 0,63 % for the 0,10 m probe (in the plane of the loop), the average field is only 0,31 % more than the central (calibration field) value.

The equation for magnetic fields produced by two square coils can be derived using Equation (A.1) and the principle of superposition [24]. The necessary condition for square Helmholtz coils is that the spacing between the coils is equal to $0,5445 \times 2a$, where $2a$ is the side dimension of the coil system [6].

By varying the frequency of the current through the loop, the frequency response of the field meter may be determined for the frequency range of interest. For a suitably designed detector with a stage of integration, a field meter with an air core probe should indicate a nearly constant rms value as the frequency is varied (see Clause A.1, last paragraph for discussion of resonance frequency effects of calibration coil). A similar result should be obtained with a coil probe that has a core of soft ferromagnetic material, if the change in permeability as a function of frequency is negligible.

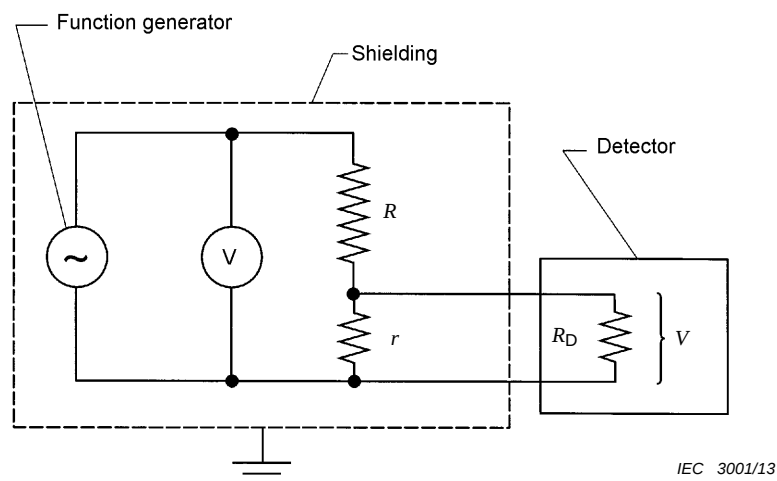
Calibration of the higher scales of a magnetic field meter, i.e. $> 10 \mu\text{T}$, can usually be performed with a field generated by a coil system because background fields that are typically $0,1 \mu\text{T}$ or less make a negligible contribution to the calibration field. However, the presence of background fields can prevent calibration of the more sensitive scales because of their perturbing effects on the calibration field. An alternative procedure for calibrating the sensitive scales is to use the voltage injection technique [8].

A.1.2 Voltage injection method

The voltage injection technique may also be useful for calibrating the very high ranges of field meters, e.g. ranges greater than 10 mT, when there may be technical difficulties in generating such fields with a coil system.

NOTE Because of constraints introduced by instrument design, the voltage injection calibration method may only be applicable during the design stage or manufacturing stage of the field meter.

Using this procedure, the volts/tesla produced by a coil probe (when connected to the detector circuit) can be determined at each frequency of interest, using a voltmeter connected to the input of the detector and a magnetic field that is at least two orders of magnitude larger than the background field. Voltages that correspond to smaller magnetic fields are then injected into the detector circuit (with the probe disconnected) to calibrate the more sensitive scales of the magnetic field meter. A voltage divider with a well-known ratio when connected to the detector, an a.c. voltage source (e.g. a function generator), an accurate voltmeter, and adequate electric field shielding can be used to inject the known voltages for the frequency range of interest [8]. The frequency dependence of the voltage divider ratio should also be known in order to carry out the calibration. Figure A.6 shows a schematic view of a voltage injection circuit connected to the detector.



The voltage V from a function generator is reduced for injection purposes using a resistive divider. The injected voltage v is given by $Vr/(R+r)$ in the absence of frequency effects on the divider ratio. R and r are resistors with R typically much larger than r . The input impedance of the detector is approximated as a resistance R_D . The relation $r \ll R_D$ shall be satisfied to avoid significantly affecting the value of the divider ratio.

Figure A.6 – Diagram for voltage injection technique

The voltage injection approach may not be applicable to probes with ferromagnetic cores because the permeability of the core may vary with the magnetic flux density and affect the probe sensitivity (volts/tesla). It should be noted that the voltage injection technique can also be used as a means of verifying the calibration of all ranges of the magnetic field meter.

A.1.3 Comparison with reference magnetic field meter

A third method for calibrating instrumentation is performed by comparing field meter readings with a reference magnetic field meter that has previously been calibrated in a known magnetic field and/or by the voltage injection technique. With this approach, the field values determined with each sensor of the single-axis and three-axis field meters are compared with measurements obtained with the reference field meter in the same magnetic field (produced by a coil system). It is assumed that (1) the sensor dimensions of the meter being calibrated and the reference meter are comparable, or the field uniformity is sufficiently great that the averaging effects of the sensors (over their cross-sectional areas) are not significantly different, (2) the pass-band of the field meter being calibrated is comparable to that of the reference meter, and (3) background magnetic fields (typically unstable) do not make significant contributions to the calibration field. Comparisons are made at field levels and frequencies of interest.

Alternatively, the reference magnetic field meter may be used to verify the calibration of a coil system used for calibration purposes.

NOTE 1 Comparison of the magnetic field meter readings with the calibration field values enables the determination of correction factors that should be applied to readings when measurements are performed. Alternatively, the comparisons allow corrective adjustments to be made in the detector circuit. In either case, the uncertainty associated with the above calibration processes is equal to the uncertainty in the value of the calibration field values (once the corrections have been made) combined with uncertainties related to the stability and resolution of the field meter readings.

Perturbations of the calibration field can be produced by image current loops in nearby ground planes. For example, when the plane of a square loop is parallel to a *perfect* ground plane, the perturbation of the field at the centre of the loop is 2 % and 0,3 % for distances of one and two loop-side dimensions, respectively. The perturbation is reduced when the plane of the loop is perpendicular to the ground plane, e.g. the perturbation for the square loop is 0,3 % when the side of the loop is one side dimension away from the ground plane. Perturbation of the calibration field is less for square Helmholtz coils [7].

Perturbations of the calibration field can also occur because of ferromagnetic materials in close proximity to the calibration loop. For example, large permeability materials, such as steel in a nearby cabinet or desk or a bracket under a table, will concentrate the magnetic flux and may perturb the value of the calculated field in the calibration loop. The influence of nearby ferromagnetic materials on the calibration field should be checked using a trial and error approach, e.g. the influence of a nearby relay rack on the magnetic field could be examined as a function of distance from the calibration coil.

Calibrations should be performed at frequencies well removed from the resonance frequency of the coil system. Because of the stray capacitance, the equivalent circuit of the coil system can be roughly modelled as an inductor and capacitor in parallel. Near and at resonance frequencies, significant amounts of current to the coils will be shunted through the stray capacitance and will not contribute to production of the magnetic field. One approach to determine the resonance frequency of a coil system is to measure the voltage across the coils as a function of frequency while keeping the current to the coils constant. At frequencies well removed from the resonance frequency, the voltage will increase linearly. Near the resonance frequency, the impedance of the coil system and the associated voltage measurement will become non-linear and increase more rapidly.

NOTE 2 A specific analysis will be necessary to determine an upper operating frequency limit for calibration coils.

A.2 Calibration of electric field strength meters

A.2.1 Electric field generation method

Nearly uniform electric fields may be produced for calibration purposes with parallel plates, provided that the dimensions of the plates are sufficiently large relative to the plate spacing, [1] [13], [32]. Ignoring edge effects, the uniform field value E_0 is given by V/d where V is the applied potential difference across the plates and d is the plate spacing. As a guide for determining parallel plate dimensions, the calculated magnitudes of the electric field strength E , normalized by the uniform field (E/E_0) at the plate surface and midway between the plates, are plotted as a function of normalized distance x/d from the plate edge as shown in Figure A.7. Numerical values are presented in Table A.1.

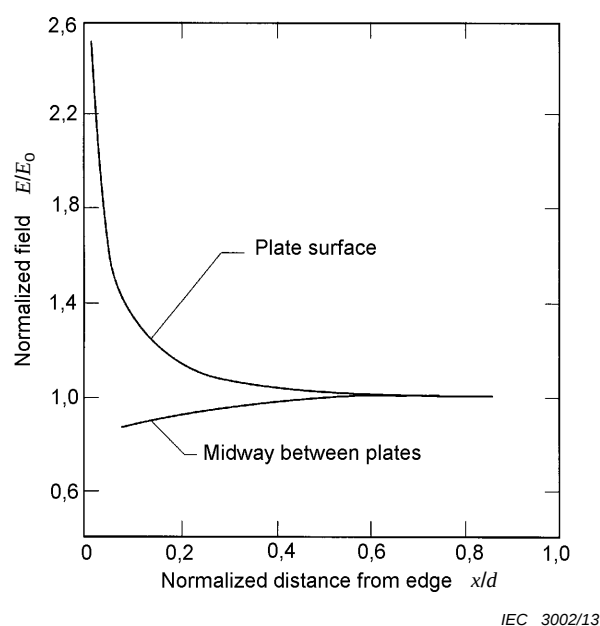


Figure A.7 – Calculated normalized electric field at plate surfaces and midway between plates as a function of the normalized distance from the edge of the plate

The results in Table A.1 show that the departure from field uniformity due to fringing fields decreases to 0,1 % at a distance of one plate spacing from the edge. For square plates of finite size, the effect of the fringing fields from the four edges may be estimated using the principle of superposition when the effect from one edge is less than 0,1 %. Numerical calculations of the field between finite size parallel plates suggests a discrepancy of 0,04 % using this approach [32]. These results are valid in the absence of perturbations from nearby ground planes. Calculations and measurements [19] , [32] indicate that energization of the parallel plates with a centre-tapped transformer provides a field that is more immune to perturbations due to nearby ground planes.

A parallel plates system that has been proven suitable for calibrations of free-body meters with diagonal dimensions less than 0,23 m is shown in Figure A.8 [13]. Metal sheets or a tightly stretched metal screen on frames of 1,5 m × 1,5 m, and a separation of 0,75 m are used to form the parallel plates. The plates are energized with a function generator/power amplifier/transformer combination which has adequate current-limiting resistors in the transformer output leads as a safety measure [3]. For example, 10 MΩ and larger resistors of adequate voltage rating are satisfactory up to 10 kV (i.e. $E \approx 13$ kV/m). Normal high-voltage laboratory safety practices shall be followed when working with high voltages. A calibration field that is within 1 % of the uniform field value, V/d , is produced at the centre of the parallel plates system described above (uncertainties in the values of V and d should be combined with the 1 %). The free-body meter is positioned at the centre of the parallel plates system with the insulating handle normally used during measurements.

To avoid significant perturbations of the surface charge distributions on the parallel plates due to the presence of the field meter, the largest diagonal dimension of the meter should not be greater than 0,23 m [23]. In addition, the distance from the parallel plates to the nearest ground plane (walls, floor, etc.) should be one plate spacing or more. The parallel plates system may be scaled upwards or downwards for larger or smaller field meters.

NOTE If corona occurs at the edges of the parallel plates, it can be eliminated by attaching metal tubes along the edges to reduce the surface electric field strength.

By varying the frequency of the voltage to the parallel plates, the frequency response of the field meter may be determined.

**Table A.1 – Calculated normalized electric field values
midway between plates and at plate surfaces**

Midway between plates	
x/d	E/E_0
0,069 8	0,837
0,162 1	0,894
0,296 5	0,949
0,417 7	0,975
0,682 1	0,995
0,793 4	0,997
1,000 0	0,999
Plate surfaces	
1,000 0	1,001
0,795 4	1,002
0,686 1	1,005
0,437 6	1,025
0,243 1	1,095
0,162 4	1,183
0,123 0	1,265
0,099 1	1,342
0,082 9	1,414
0,045 2	1,732
0,030 7	2,000
0,018 5	2,449

If the distance of the lower plate to the floor is less than one plate spacing, the arrangement designed to energize the parallel plates as shown in Figure A.8 may be modified so that the lower plate is at ground potential.

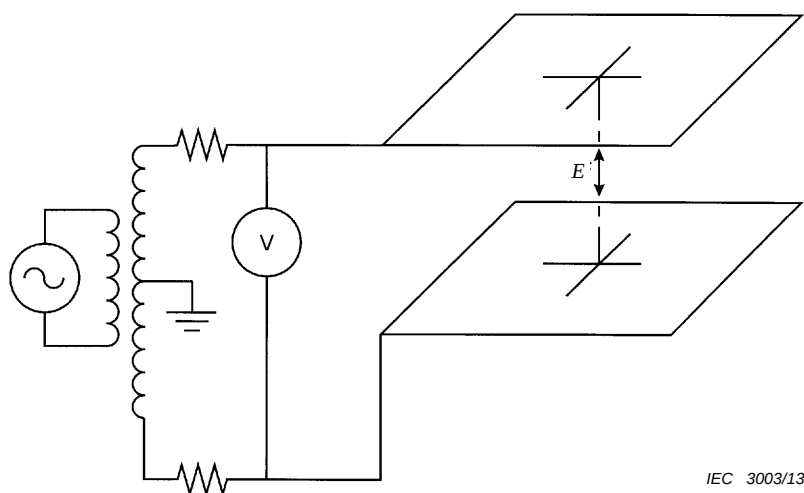


Figure A.8 – Parallel plates system for calibrating free-body electric field meters

In addition to orienting the plates parallel to the floor, the arrangement of Figure A.8 may also be used with the plates oriented perpendicular to the floor.

Note that the distance to the floor, ceiling and walls should still be greater than one plate spacing. Using the perpendicular plate orientation an insulating support can be easily fixed in the plane of zero potential between the two plates as shown in Figure A.9.

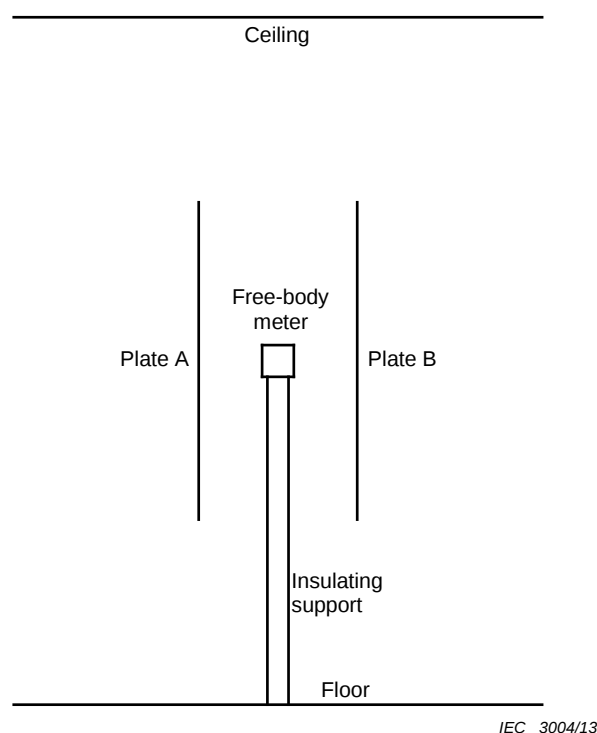


Figure A.9 – Arrangement with parallel plates orientated perpendicular to the floor

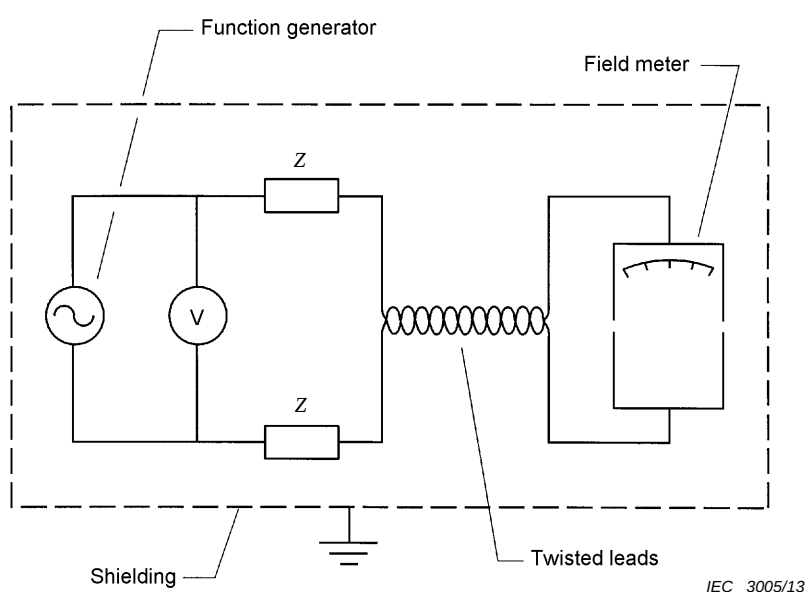
For calibrations of ground reference type field meters, the arrangement designed to energize the parallel plates as shown in Figure A.8 is modified so that the bottom plate is at ground potential and is used as a support for the flat probe.

Because of the increased distance between the probe and top plate, the perturbation of the surface charge distribution on the top plate by the probe is greatly reduced (compared with free-body meters midway between the plates). This decreased perturbation permits reduction of the parallel plate spacing previously indicated (0,75 m) and thereby increases the lateral extent of the nearly uniform field region (see Figure A.7 and Table A.1). The parallel plate spacing should be no larger than 1,5 times the side dimension of the probe, and the edges of the probe should be no closer than two plate spacings to any edge of the bottom plate. The distance between the parallel plates and the nearest ground plane (walls, floor, etc.) should be greater than two plate spacings. The guard band should be at least as wide as 6 % of the side dimension and the thickness of the probe should not exceed 3,5 % of its side dimension. With the above restrictions the calibration field will be within 0,5 % of the uniform field value V/d (uncertainties in the values of V and d should be combined with the 0,5 %) [22] .

NOTE Comparisons of the electric field meter readings with the calibration field values enables the determination of correction factors that should be applied to readings when measurements are performed. Alternatively, the comparisons allow corrective adjustments to be made in the detector circuit. In either case, the uncertainty associated with the above calibration processes is equal to the uncertainty in the value of the calibration field values (once the corrections have been made) combined with uncertainties related to the stability and resolution of the field meter readings.

A.2.2 Current injection method

Free-body and ground reference field meters, in their initial response to an electric field, can be considered as current measuring devices². Therefore, if the ratio of induced current to electric field I/E for an electric field meter is determined by calibration, a current injection scheme may be used later as a means for verifying the instrument calibration if parallel plates are unavailable [19]. Figure A.10 shows a circuit that can be used for injecting known currents into the sensing electrodes of a free-body-type meter. In Figure A.10, V is the voltage produced by a function generator and Z is a known impedance at least two orders of magnitude greater than the input impedance of the field meter. Although Z may consist of capacitors or resistors, resistors are preferred because the impedance of capacitors will change when the current injection technique is used at different frequencies. Further, if there are harmonics in the voltage source, smaller errors will be introduced with the use of resistors. The injected current can be calculated from Ohm's law.



Although Z may represent either capacitors or resistors, resistors are preferred (see text in Clause A.2).

Figure A.10 – Diagram for current injection technique

A circuit similar to the one shown in Figure A.10 may be used for injecting currents into ground-reference-type field meters. In this case, the impedance on the ground side of the voltage source is removed and the remaining impedance is doubled in value.

Adequate shielding is required when the current injection technique is employed in order to minimize signal contributions from such sources as nearby lighting and electrical equipment. Enclosing the current injection circuit and field meter with a grounded metal screen can reduce the signal contributions from background sources to negligible levels. The validity of the current injection approach assumes that the ratio I/E is determined soon after calibration of the field meter in a known electric field and that the field meter probe has not been modified since its calibration.

A.2.3 Comparison with electric field reference

The method is the same as described in A.1.3.

² Afterwards, if there is a stage of integration in the detector circuit, the field meter reading will be proportional to the induced charge which tracks the waveform of the electric field.

Annex B (informative)

Example of calibration uncertainty

Table B.1 gives an example of calculation of calibration uncertainty for **B** field using an Helmholtz coils system. A magnetic field of 100 μT is assumed. The uncertainty sources come from the analysis of the calibration system described in Annex A.

Table B.1 – Example of uncertainty calculation

Uncertainty sources	Reference	Value of the uncertainty uv_i	Probability distribution	Division factor k_i	Sensitivity coefficient C_i	Standard uncertainty $u_i = uv_i / k_i$
Statistic						
Repeatability	A1	$2,0 \cdot 10^{-4}$		$\sqrt{5}$	1	$8,95 \cdot 10^{-5}$
Reproducibility	A2	$3,0 \cdot 10^{-4}$		$\sqrt{3}$	1	$1,73 \cdot 10^{-4}$
Equipment						
Calibration of the amperemeter	BR1	$7,1 \cdot 10^{-4}$	Normal	2	1	$3,55 \cdot 10^{-4}$
Drift of the amperemeter	BR2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	Rectangular	$2\sqrt{3}$	1	$3,46 \cdot 10^{-5}$
Resolution of the amperemeter	BL1	$\pm 1,0 \cdot 10^{-6}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-7}$
Interpolation of the amperemeter	BL2	$\pm 2,9 \cdot 10^{-4}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	$1,67 \cdot 10^{-4}$
Influence of the temperature on the amperemeter	BL3	0	U-shaped	$2\sqrt{2}$	1	0
Physical characteristics of the Helmholtz coils	BL4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Normal	2.58	1	$3,88 \cdot 10^{-4}$
Influence of the temperature on the Helmholtz coils	BL5	0	U-shaped	$2\sqrt{2}$	1	0
Influence of the current source	BL6	0	Rectangular	$2\sqrt{3}$	1	0
Stability of the device under test	BLX		Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0
Environmental parameters						
Noise	BL7	$5,0 \cdot 10^{-4}$	Rectangular	$2\sqrt{3}$	1	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Combined standard uncertainty			$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m C_i^2 \cdot u_i^2}$			$6,04 \cdot 10^{-4}$
Expanded uncertainty (95 % confidence interval)			Normal	$u_e = 2u_c$		$1,2 \cdot 10^{-3}$

- | | |
|------|--|
| A1: | number of repetition of measurements N . $k_i = \sqrt{N}$ |
| A2: | the value of incertitude comes from inter laboratory comparison |
| BR1: | the value comes from last calibration certificates of amperemeter |
| BR2: | variation between calibration of amperemeter |
| BL1: | variation of the last digit of the amperemeter |
| BL2: | due to the fact that the amperemeter is not used on the points where it was calibrated |
| BL3: | negligible |
| BL4: | uncertainty of the physical dimensions of the coils, value chosen $10 - 3$ at 99 % |
| BL5: | negligible |
| BL6: | negligible here but to be defined in function of the meter calibrated and of its stability |
| BL7: | noise |
| BLX: | the variation of the measuring instrument itself is neglected |

Annex C (informative)

General characteristics of magnetic and electric fields

C.1 General

Magnetic and electric fields produced by power lines, appliances and transportation systems can be characterized according to their magnitude, frequency, waveform (harmonic content), degree of polarization, spatial variation, and temporal variation. These characteristics are described briefly because of their importance in specifying requirements for instrumentation used to measure the fields.

NOTE This standard does not consider transient temporal variations, i.e. events that occur in a time that is short compared to the period of the magnetic and electric fields.

C.2 Polarisation

Several of the above field parameters can be introduced by considering the case of magnetic fields produced by three-phase power lines. Some of the same parameters are also used to characterize electric fields. In general, the field at a point in space can be represented as a rotating vector that traces an ellipse for every cycle of the currents in the conductors as shown schematically in Figure C.1a [4]. The rms magnitude and direction of the semi-major axis of the field ellipse, given by M in Figure C.1a, indicate the magnitude and direction of the maximum field. Similarly, the rms magnitude and direction of the semi-minor axis, given by m in Figure C.1a, describe the magnitude and direction of the minimum field. Such fields are said to be elliptically polarized.

Because fields in environments situated away from power lines can also be produced by multiple sources that are not necessarily in phase, elliptically polarized fields can occur in many settings (e.g. the home, the work place, etc.). Depending on the geometry and currents or voltage in the conductors, the degree of field polarization at a given point can vary from linear ($m = 0$) to circular ($m = M$) as shown in Figures C.1b and C.1c. This discussion of polyphase fields assumes that there are no harmonics in the field. The polarization state of fields with a significant harmonic content is more complicated[21], [30].

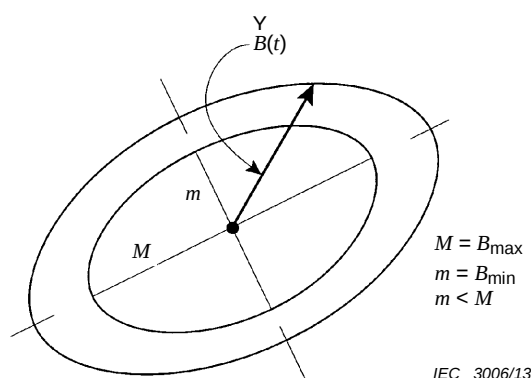


Figure C.1a – Quantities for elliptical polarization, $m < M$

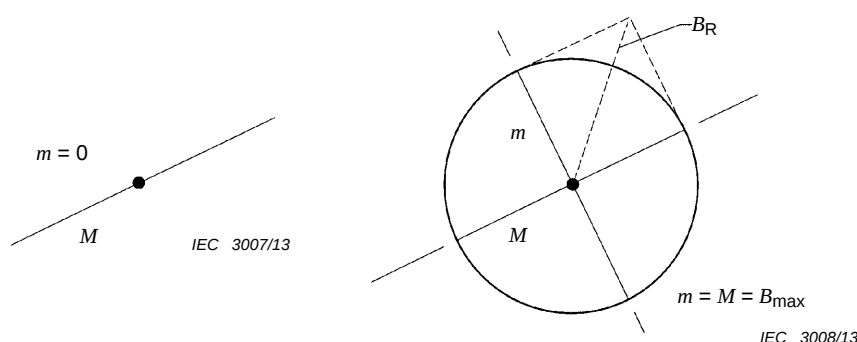


Figure C.1b – Quantities for linear polarization, $m = 0$

Figure C.1c – Quantities for circular polarization, $m = M$

The resultant B_R and the maximum magnetic field M are equal only for the case of linear polarization. The largest difference between the resultant and maximum magnetic field occurs for circular polarization, i.e. B_R exceeds M by 41 %.

Figure C.1 – Oscillating and rotating field quantities for cases of elliptical polarization, linear polarization, and circular polarization

C.3 Characteristics of magnetic field

Near ground level the magnitude of the magnetic field from a three-phase transmission line changes slowly as a function of the height of the measurement point above ground. For example, for a typical 500 kV line, the change in the magnetic field magnitude at a height of approximately 1 m above ground level is less than 2 % for a 10 % change in the measurement height for locations underneath the line. The uniformity increases at more distant points [11] .

For locations far from the line, the magnitude of the magnetic field from a single-circuit three-phase line, with balanced or nearly balanced currents, decreases approximately as $1/r^2$, where r is the lateral distance from the line (r is assumed to be much greater than the conductor spacing) [26] . As the current imbalance increases, the decrease in magnetic field magnitude changes from a $1/r^2$ to a $1/r$ dependence [26], [33]. The magnetic field from balanced double-circuit three-phase lines with low reactance phasing (i.e. for identical or nearly identical load currents for both circuits) decreases approximately as $1/r^3$ where r is again much larger than conductor spacing. The temporal variations of the magnetic field is a function of load current variations, e.g. during heavy usage of electrical energy, the load currents increase and produce greater magnetic fields (the concurrent sagging of the conductors can also contribute to greater field levels).

NOTE While the magnetic field at and near ground level beneath a polyphase power line can be represented as a rotating vector or field ellipse, the electric field becomes linearly polarized at ground level.

Other commonly encountered sources of magnetic fields are straight conductors (e.g. connections to grounding systems/electrodes) and approximately circular turns of wire (e.g. found in transformers, motors, video display terminals) with single-phase currents. The magnetic field lines and vectors at representative points from such sources are shown schematically in figures C.2a and C.2b. The magnetic fields are usually linearly polarized and the time-dependence of the oscillating vectors depends on the waveform of the currents. Sinusoidal currents produce sinusoidal magnetic fields free of harmonics, and non-sinusoidal currents (e.g. the sawtooth waveforms from television deflection coils) produce non-sinusoidal magnetic fields that can be rich in harmonics [12]. The magnitudes of magnetic fields produced by currents in an infinitely long straight wire and a circular loop of wire decrease as $1/r$ [10] and $1/r^3$ [31], respectively, where r is the distance from the field source (in the latter case it is assumed that r is much greater than the radius of the circular loop of wire).

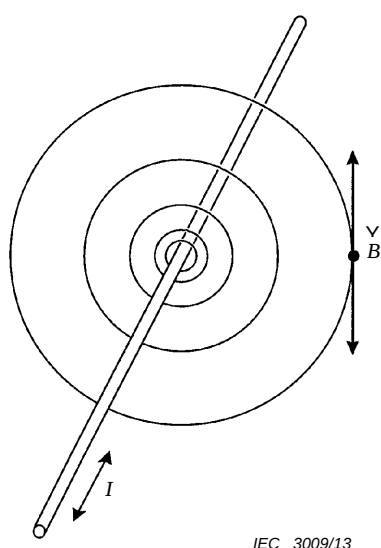


Figure C.2a – Current in straight conductor

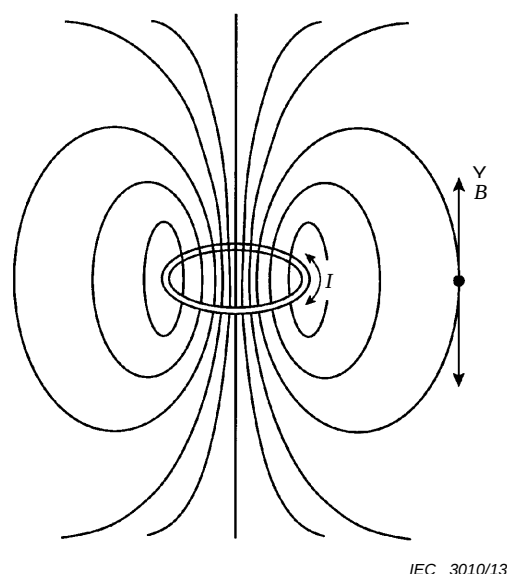


Figure C.2b – Current in circular conductor

Figure C.2 – Magnetic field from current in straight and circular conductors

C.4 Characteristic of electric field

Near ground level the magnitude of the electric field from a three-phase transmission line changes slowly as a function of the height of the measurement point above ground[11].

Contrary to the magnetic field, the electric field is perturbed by most objects. This is called the proximity effect. This is due to the difference of electric charge distribution between media.

Between media 1 and media 2, passage conditions are

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (\text{C.1})$$

and

$$\epsilon_2 E_{2n} - \epsilon_1 E_{1n} = \rho_s \quad (\text{C.2})$$

where t = tangential component, n =normal component, ρ_s is the charge density of the surface between media

For example, a man in a 50 Hz electric field perturbs the electric field distribution (Figure C.3)

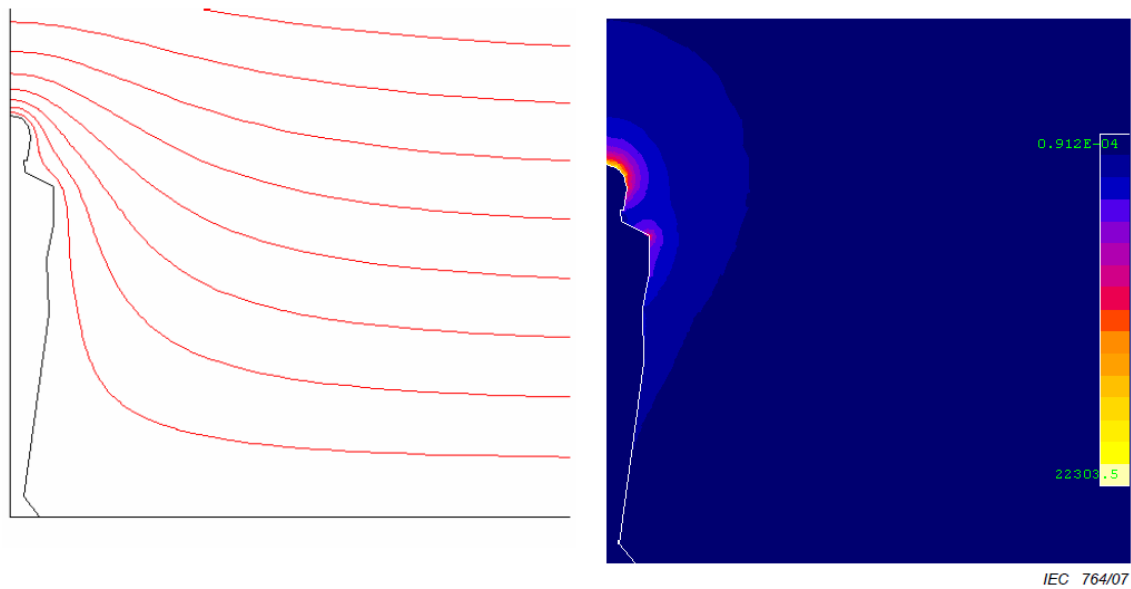
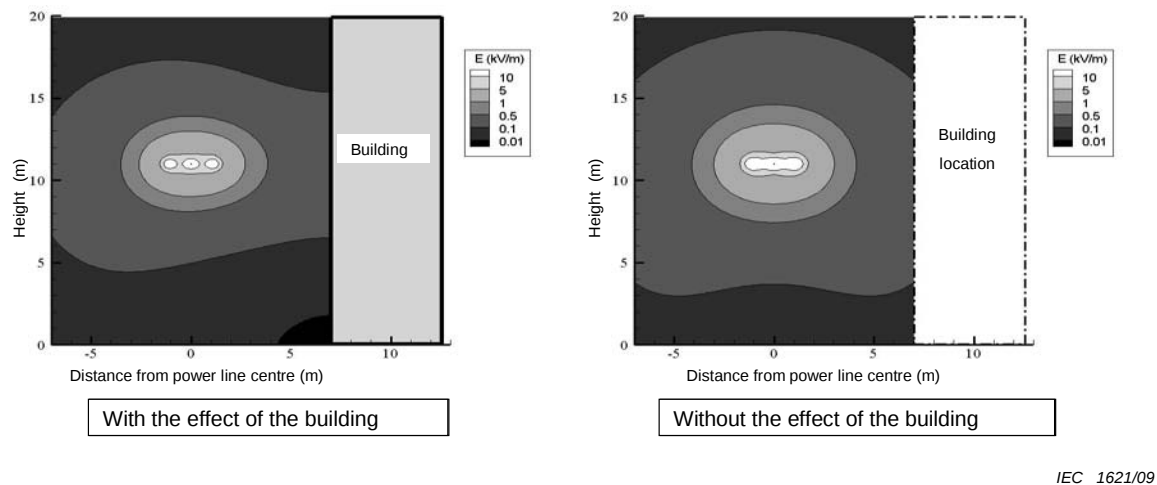


Figure C.3 – Perturbation of electric field distribution by a person (from IEC 62226-3-1)

The same phenomenon can be observed with big structures such as buildings (Figure C.4)



Key

- Conductor height 11,0 m
- Conductor separation 1,12 m
- Building height 20,0 m, located at 7,0 m from the centre of an overhead line

Figure C.4 – Proximity effect with a 25 kV line and a building (from IEC 62110)

Annex D (informative)

Magnetic flux density meters (magnetic field meters)

D.1 General characteristics of magnetic field meters

Magnetic field meters consist of two parts, the probe or field-sensing element, and the detector, which processes the signal from the probe and indicates the rms value of the magnetic field with an analogue or digital display. Magnetic field probes, consisting of an electrically shielded coil of wire (i.e. a "single-axis" probe), have been used in combination with a voltmeter as the detector for survey type measurements of power frequency magnetic fields from power lines [13]. A diagram of this kind of instrumentation, which is one example of a survey meter, is shown in Figure D.1. While not indicated in Figure D.1, components of the detector circuit are sometimes incorporated with the probe. Magnetic field meters measure the component of the oscillating (linearly polarized) or rotating (elliptically or circularly polarized) magnetic field vector that is perpendicular to the area of the probe(s). The direction normal to the area of the probe coincides with the sensitive axis of the probe.

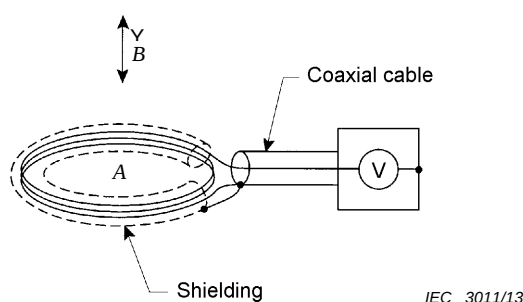


Figure D.1 – Schematic view of simple magnetic field meter with coil-type probe

For measurements in environments where the harmonic components in the magnetic field may not be negligible (e.g. industrial and residential settings, transportation systems), a stage of integration (active or passive) is made part of the detector circuit in order to preserve the waveform of the magnetic field (see Clause D.2). Typically, no provision is made for the storage of data, although output connectors for commercially available recorders are sometimes provided. To characterize the harmonic content in the magnetic field, the detector signal (which reflects the waveform of the magnetic field) can be examined using commercially available spectrum analysers to obtain the amplitudes of the fundamental and harmonic components. Three-axis magnetic field meters are also available, which can be switched or tuned to indicate the rms values of the power frequency and one or more harmonic field components.

During survey type measurements of the magnetic field, the probe can be held by hand without significant perturbation of the field due to the proximity of the observer. Proximity effects of nearby dielectrics are also insignificant. Proximity effects of small non-ferrous conductors are usually weak and located near the conductor surface, i.e. magnetic fields associated with eddy currents induced in the conductor by the time-variation of the magnetic field will perturb the field locally. Large non-ferrous metal structures can significantly perturb the field over an extended region, e.g. the interior of some mobile homes. Magnetic fields near ferrous objects are significantly perturbed.

For long-term and/or more comprehensive measurement applications, the survey-type field meter can be replaced with instrumentation which records the readings of the field in a data storage system [12], [30]. The recordings of the field can be made automatically at

predetermined time intervals, triggered by the user, or triggered by some other source, such as position-detecting equipment.

The recorded field values can often be downloaded to a computer at a later date for subsequent analysis. Alternatively, a simple analysis may be performed by the instrument itself.

Both survey meters and logging instruments can be single-axis or three-axis (although logging instruments are more likely to be three-axis). Three-axis instruments can have three coil probes or sensing elements (e.g. circular coil probes with orthogonal axes) which detect the field along three mutually orthogonal directions. The signal from each sensing element of three-axis meters can be processed by the detector in one of two ways. In one approach, the detector determines the rms value of each spatial component, squares and sums them, and then takes the square root of the sum. In the other approach, the detector squares the signal from each sensor, takes the square root of the sum, and then determines the rms value of the square root. Both methods yield the same result, which is the resultant magnetic field B_R , as defined by Equation (3). In general, the resultant magnetic field is not equal to the maximum magnetic field, varying from 100 % (for linearly polarized fields) to 141 % (for circularly polarized fields) of the maximum magnetic field.

It should be noted that B_R is also equal to the rms total magnetic flux density [16], regardless of the phases of the orthogonal components. One consequence of the phase independence is that B_R is not unique, in the sense that the same resultant magnetic field can be produced by magnetic fields with different geometries, e.g. a linearly polarized magnetic field with orthogonal components $B_0 \sin \omega t$ and $B_0 \sin \omega t$, and a circularly polarized magnetic field with orthogonal components $B_0 \sin \omega t$ and $B_0 \cos \omega t$ will have the same resultant B_0 .

The development in recent years of small personal exposure meters for the measurement of magnetic fields, devices that can be worn to measure periodically and record the three (rms) spatial components of the magnetic field, has also led to the use of miniature coil probes, sometimes containing ferromagnetic cores for increased sensitivity [12]. The orthogonally oriented probes in exposure meters, while in close proximity to one another, may not share a common central point, i.e. the probes are at different locations. Exposure meters are equipped with a computer interface which permits the downloading of the recorded field values to a computer for later analysis. Other types of field meters with high permeability inductor probes, such as the fluxgate magnetometer [27], have been adapted for alternating and/or static field measurements.

Yet more sophisticated instrumentation is available that periodically records the magnetic field waveform of the three orthogonal field components at the same instant, and thus contains magnitude, phase, and frequency information that is subsequently analysed for degree of polarization, harmonics, etc. [30].

Also available are magnetic field meters with Hall effect probes that can be used to measure magnetic flux densities from zero hertz to several hundred hertz. However, because of their low sensitivity and saturation problems due to the earth's field, they are not suited for low level a.c. field environments, e.g. in the vicinity of power lines and in residences.

D.2 Theory of operation (coil probes)

The principle of operation of the magnetic field meter shown in Figure D.1 is based on Faraday's law which predicts that a voltage V is produced at the ends of an open loop of wire placed in a changing magnetic field. Specifically, the voltage is equal to the negative of the time-rate-of-change of the flux ϕ through the loop, as given by

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dA \right] \quad (\text{D.1})$$

where

$\mathbf{B}$ is the magnetic flux density;

$\mathbf{n}$ is a unit vector perpendicular to the area of the loop;

dA is an element of the area A of the loop.

V will be in units of volts when A and $\mathbf{B}$ are in square meters and tesla, respectively.

If the magnetic field is free of harmonics, e.g. $B = B_0 \sin \omega t$, and perpendicular to the area of the probe, then

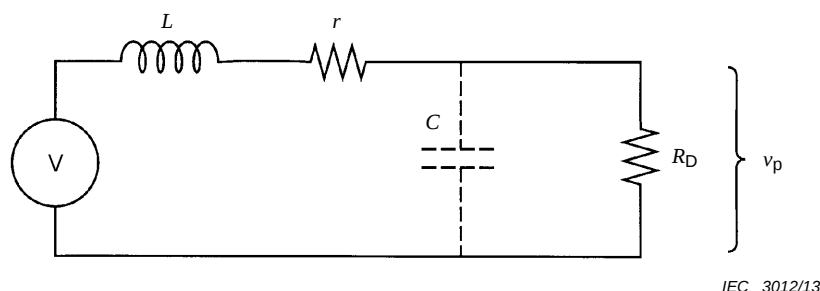
$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t \quad (\text{D.2})$$

where the angular frequency ω is equal to 2π times the frequency.

For N turns of wire in the loop, the voltage given by Equation (D.2) will develop across each turn and the total voltage will be $-N\omega B_0 A \cos \omega t$. Equation (D.2) shows that the sensitivity increases with the area of the probe.

Coil probe can also be used to measure static (d.c.) magnetic flux density if the probe is rotated.

If there are harmonics in the magnetic field, there will be an additional term on the right side of Equation (D.2) for each harmonic. Because of the differentiation operation (Equation (D.1)), each of the additional terms will be weighted by the associated harmonic number. For example, if there were 10 % third harmonic in the field, the term $-3 \times 0,1 \times \omega B_0 A \cos 3\omega t$ would be added to the right side of Equation (D.2). Because of the weighting of the harmonic term, the waveform of the signal will no longer reflect the waveform of the field. Consequently, the rms value indicated by the voltmeter-detector (see Figure D.2) will not accurately represent the rms value of the field. The waveform does, however, give a good approximation of the time-variation of the voltage or current induced in conducting materials.



IEC 3012/13

Key

L coil inductance

r wire resistance

C stray capacitance

R_D input impedance of detector

Figure D.2 – Approximate equivalent circuit of a coil probe when connected to the detector

To recover the magnetic field waveform it is necessary for the detector to perform the inverse mathematical operation, namely integration. This can be accomplished by introducing a stage of integration in the detector³. For example, the integration stage can be combined with the probe in the form of passive components, or an integrating operational amplifier can be incorporated into the detector. The frequency response of the probe-integrating detector combination should be made flat over the frequency range of interest. Filters and adequate electric field shielding should be part of the detector circuit design to exclude unwanted signals.

D.3 Static magnetic field-measuring instrumentation

Measurements of static magnetic fields can be performed accurately with a range of commercially available instrumentation employing a variety of measurement techniques [20], [14]. For example, fluxgate magnetometers, nuclear magnetic resonance (NMR) field meters, Hall effect field meters, magnetoresistive field meters and the superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers are a few of the instruments available.

The range of measurement of these meters depends on the measurement technique used. They cannot be used for measuring the static magnetic field in all environments. For example, Fluxgate magnetometers have adequate sensitivity to measure fields in the range of 0,1 μT (and lower) to 0,01 T, and are adapted for DC high voltage networks environments.

Hall-effect meters can readily measure levels between 100 μT and 10 T [20]. In the same order of magnitude, the very high accuracy of NMR magnetic field meters enables them to be used as a reference standard.

Standard reference magnets are commercially available for calibration purposes at relatively high field levels, e.g. 0,005 T to 2 T. The coil systems referred to in Clause A.1 can be used to generate known static fields with lower values if direct currents are used to energize the coils. However, the influence of the background static field should be considered when significant in magnitude compared to the calibration field. Standard reference magnets are available with magnetic shields to prevent perturbations from external magnetic fields. The background static field may also be cancelled using a set of auxiliary coils, by doing first a calibration with a zero current, and subtracting the value.

3 If the signal is digitized, the integration can be done by computation

Annex E (informative)

Electric field strength meters (electric field meters)

E.1 General characteristics of electric field meters

Electric field strength meters consist of two parts, the probe or field-sensing element and the detector, which processes the signal from the probe and indicates the rms value of the electric field strength in units of volts per meter using an analogue or digital display. The following two types of electric field meters are considered in this standard:

- a) the free-body meter;
- b) the ground reference meter.

When measurements of the electric field strength are performed, the observer should be sufficiently removed from the probe to avoid significant perturbation of the field at the location of the probe. Free-body meters should be sufficiently small so that the size of the probe does not significantly perturb the charge distributions on boundary surfaces generating the electric field, i.e. energized and grounded surfaces. Although field meters are calibrated in nearly uniform electric fields, the field that is measured need not be very uniform. Electric field meters measure the projection of the oscillating (linearly polarized) or rotating (elliptically or circularly polarized) electric field vector onto the electrical axis of the probe (the axis of greatest electric field sensitivity). Three-axis free-body electric field meters are available for measuring the resultant electric field.

E.2 Theory of operation

E.2.1 Free-body meters

Free-body meters are commonly constructed to measure the induced current between two isolated parts of a conductive body. Since the induced current is proportional to the time derivative of the electric field strength, the meter's detector circuit often contains an integrating stage in order to recover the waveform of the electric field. The integrated current waveform also coincides with that of the induced charge. The integrating stage is also desirable, particularly for the measurement of electric fields with harmonic content, because this stage (i.e. its integrating property) eliminates the excessive weighting of the harmonic components in the induced current signal.

Free-body meters determine the electric field strength by measuring the steady-state induced current or charge oscillating between the conducting halves (electrodes) of an electrically isolated probe, after the probe has been introduced into the electric field. For commercially available free-body meters, the detector is usually contained in or is an integral part of the probe. The probe and detector are supported in the electric field at the end of an insulating handle [5], [13]. The free-body meter is suitable for survey type measurements because it is portable, allows measurements above the ground plane, and does not require a ground reference potential. Single-axis and three-axis free-body meters are commercially available. Free-body meters are normally battery-powered.

There are also free-body meters designed for remote display of the electric field strength. In this case, a portion of the signal-processing circuit is contained in the probe and the remainder of the detector is in a separate enclosure with an analogue or digital display. A fibre-optic link connects the probe to the display unit [9], [17].

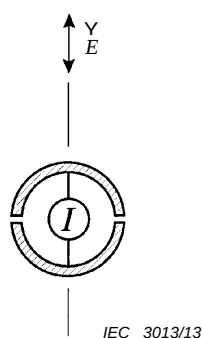


Figure E.1a – Spherical free-body electric field meter

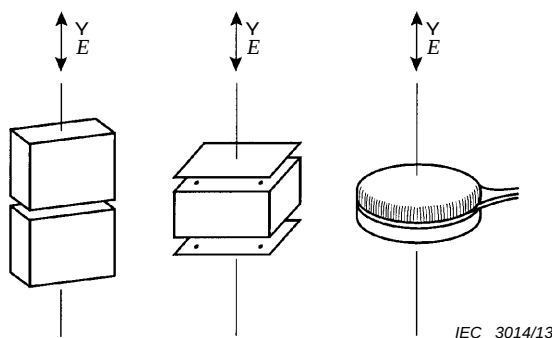


Figure E.1b – Commercial single-axis electric field meters

Figure E.1 – Single-axis free-body meter geometries

Figure E.1 shows examples of single-axis free-body meter geometries. The theory of operation of free-body meters can be understood by considering an uncharged conducting body with separated halves or electrodes, introduced into a uniform electric field E . The charge induced on one of the electrodes is

$$Q = \int_{S/2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA \quad (\text{E.1})$$

where

$\mathbf{D}$ is the electric displacement;

$\mathbf{n}$ is a unit vector perpendicular to the surface of the electrode;

dA is an element of area on half of the body with total surface S .

The case of spherical geometry as shown in Figure E.1a yields the following result:

$$Q = 3\pi a^2 \epsilon_0 E \quad (\text{E.2})$$

where

ϵ_0 is the permittivity of free space;

a is the radius of the sphere [29].

NOTE The surface charge density is given by $3\epsilon_0 E \cos\theta$. Integration over the hemisphere gives Equation (E.2) (see [29]).

For less symmetric geometries, the result can be expressed as

$$Q = k \epsilon_0 E \quad (\text{E.3})$$

where k is a constant dependent on the probe's geometry.

Sensing electrodes resembling cubes and parallel plates (see Figure E.1b), have been employed. If the electric field strength has a sinusoidal time dependence, for example $E_0 \sin \omega t$, where ω is the angular frequency, the induced charge oscillates between the two halves and the current is given by

$$I = \frac{dQ}{dt} = k\omega\epsilon_0 E_0 \cos\omega t \quad (\text{E.4})$$

The constant k can be thought of as a field meter constant and is determined by calibration. The influence of the handle, representing a leakage impedance, and the perturbation introduced by the observer are taken to be negligible in the above discussion.

If there are harmonics in the electric field, there will be an additional term on the right side of Equation (E.4) for each harmonic. Because of the differentiation operation in Equation (E.4), each of the additional terms will be weighted by the associated harmonic number. As in the case of the magnetic field meter (see Clause D.2), it is necessary for the detector to perform the inverse mathematical operation, namely integration, to recover the electric field waveform. This is accomplished by introducing a stage of integration. For example, an integrating amplifier or a passive integrating circuit combined with a voltmeter could be used as a detector. The frequency response of the probe-integrating detector combination should be made flat over the frequency range of interest. Filters should be used to exclude signals outside of the frequency range of interest.

E.2.2 Ground reference meters

Ground reference meters determine the electric field strength by measuring the current or charge on the sensing surface of a flat probe. Such meters are normally used to measure the electric field at ground level or on flat conducting surfaces that are at ground potential. Two probe designs have been employed. One design makes use of a single flat conductor with an isolated central section that serves as the sensing surface. Small versions of this type of probe have been made with a double-clad printed circuit board as shown in Figure E.2a. A second design consists of two parallel plates separated by a thin sheet of insulation, with the top plate acting as the sensing surface as shown in Figure E.2b.

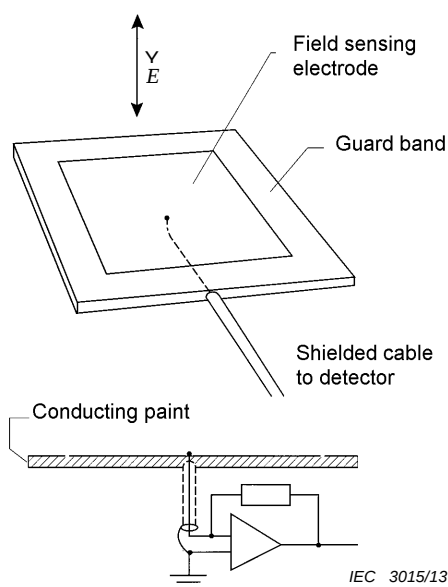


Figure E.2a – Flat probe made with double-clad printed circuit board

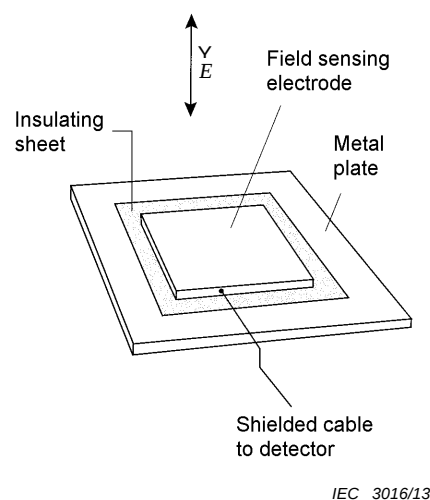


Figure E.2b – Flat probe consisting of parallel plates separated by insulating sheet

Figure E.2 – Designs for flat plate probes used with ground-referenced electric field meters

From Gauss' law, the charge Q , induced on a sensing surface with area A , is

$$Q = \varepsilon_0 EA \quad (\text{E.5})$$

where

E is the average electric field strength across the sensing surface;

ε_0 is the permittivity of free space.

Assuming that E varies sinusoidally with angular frequency ω (i.e. $E = E_0 \sin \omega t$), the resulting induced current is given by

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega \varepsilon_0 E_0 A \cos \omega t \quad (\text{E.6})$$

If there are harmonics in the electric field, there will again be an additional term on the right hand side of Equation (E.6) for each harmonic. As in E.2.1, because of the differentiation operation, each of the additional terms will be weighted by the associated harmonic number. To recover the electric field waveform, it is necessary to perform the inverse mathematical operation, namely integration. An integrating circuit/voltmeter combination that produces a flat frequency response over the frequency range of interest can serve as the detector. Filters should also be part of the detector circuit to exclude signals from outside the frequency range of interest. Ground reference meters may be battery or mains-operated.

NOTE Ground reference meters measuring the induced current often contain an integrator circuit to compensate for the derivative relationship between the induced current and the electric field.

Electric field meters with flat probes can be used to measure the electric field strength on flat electrically energized surfaces if the detector is operated at the same potential as the energized surface. In such cases, viewing of the analogue or digital display of the detector should be done remotely, for example visually, from a distance, or using a fibre-optic link.

Annex F (informative)

Influence of humidity on electric field measurement

F.1 Measurement conditions

In order to assess the influence of humidity on the electric field measurement, tests were carried out in a climatic chamber on the EDF R&D site “Les Renardières” [2]. The electric field was created by a 2 m diameter plate, at a height around 2 m, and with applied voltage so as to have a vertical electric field of about 10 kV/m. The climatic control was set up to maintain a temperature close to 20 °C and during the tests the temperature fluctuated actually between 18 °C and 21 °C. The humidity range tested was from 20 % to 100 %.

Three free-body type meters were tested, one was single axis (meter 1) and the two other were three-axis (meter 2 and meter 3)

The influence of the support of the meters was also tested and the meters were put on two tripods: a “normal” one (insulated tripod) and another with an insulating rod to horizontally offset the sensor (referred to as “offset tripod”). See Figure F.1.



IEC 3017/13



IEC 3018/13

Figure F.1 – Test in the climatic chamber with the normal tripod (left) and the offset tripod (right) (photograph EDF R&D)

The influence of coating the support of the meter with silicon grease (hydrophobic compounds) was also tested.

F.2 Results

Figures F.2 and F.3 give the main results of the tests.

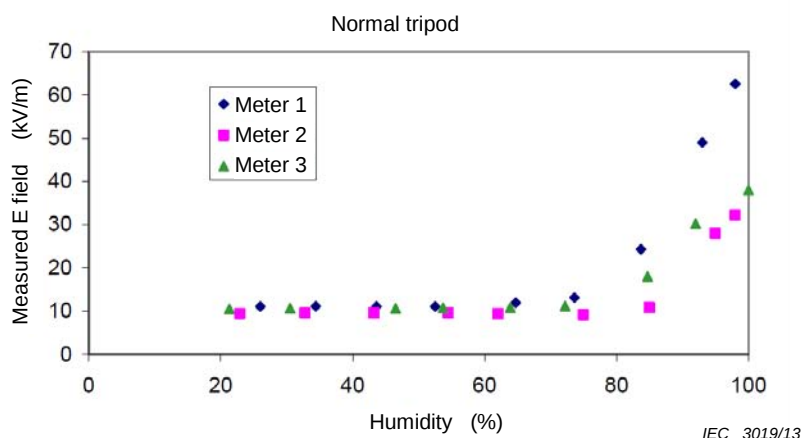


Figure F.2 – E field measured as a function of the humidity with a normal tripod

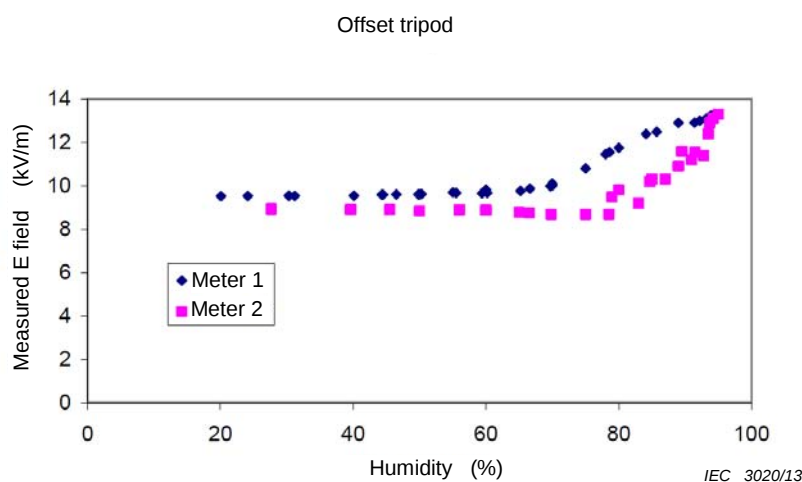


Figure F.3 – E field measured as a function of the humidity with an offset tripod

The results show the influence of the humidity on the measurement of electric field. The measured value increases with the humidity.

The drift of measured field compared to actual field is especially high with a normal tripod when the relative humidity is over 70 % (up to a 7-fold error in reading the applied field). So the offset tripod is recommended because the drift amplitude is much lower (the maximum error is only 40 % of the applied field).

The use of hydrophobic compounds (silicone grease) to coat the support has not shown any reduction of the effects of humidity.

Annex G (informative)

Units

G.1 Units

The preferred units are those taken from International System of Units (SI units) and units derived from SI units. Some commonly used SI and SI derived units are listed below.

For additional units, see [15].

G.2 SI units and SI derived units

Time:	second (s)
Electric potential:	volt (V)
	kilovolt (kV)
Current:	ampere (A)
Inductance:	henry (H)
Resistance:	ohm (Ω)
Electric field strength:	volts per metre (V/m)
Magnetic flux density:	tesla (T)
Magnetic field strength:	amperes per metre (A/m)

G.3 Useful physical constants

Permeability of free space μ_0 :	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Permittivity of free space ϵ_0 :	$8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
Conversion between tesla and gauss:	1mG = 0,1 μ T
Conversion between tesla and amperes per metre (where $\mu = \mu_0$): B (in μ T) = $0,4 \times \pi \times H$ (in A/m)	

Bibliography

- [1] BOTTAUSCIO, O., et al. Generation of reference electric and magnetic fields for calibration of power-frequency field meters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, vol. 42, no. 2, p. 547-552.
- [2] CIGRE WORKING GROUP C4.203 *Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines*. Technical Brochure n°375, 2009.
- [3] DELAPLACE, L.R. AND REILLY, J.P. Electric and Magnetic Field Coupling from High Voltage AC Power Transmission Lines -- Classification of Short-Term Effects on People. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, vol. PAS-97, no. 6, p. 2243-2252.
- [4] DENO, D.W. Transmission line fields. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1976, vol. PAS-95, no. 5, p. 1600-1611.
- [5] DENO, D.W. Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field - measurement and calculation of distribution and dose. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977, vol. 96, no. 5, p. 1517-1527.
- [6] FIRESTER, A.H. Design of Square Helmholtz Coil Systems. *Review of Scientific Instruments*, 1966, vol. 37, no. 9, p. 1264-1265.
- [7] FRIX, W.M., et al. Comparison of calibration systems for magnetic field measurement equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol. 9, no. N°1.
- [8] FULCOMER, P.M. *NBS ambient magnetic field meter for measurement and analysis of low-level power frequency magnetic fields in air*. 1985, no. NBSIR 86-3330.
- [9] GOCKENBACH, E., et al. 1989. *Some Applications of an Electric Field Sensor in the High-Voltage Technique*. In Proceedings of the Sixth International Symposium on High-Voltage Engineering, New Orleans, LA, 1989.
- [10] HALLIDAY, D. AND RESCNICK, R. *Physics, Parts I and II*. New York: Wiley & Sons, 1966. p. 861-862.
- [11] IEC 62110:2009, *Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure*
- [12] IEEE MAGNETIC FIELDS TASK FORCE. Measurements of power frequency magnetic fields away from power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, vol. 6, no. 2, p. 901-911.
- [13] IEEE STD 644-1994, *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*
- [14] IEEE STD C95.3.1:2010, *IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 100 kHz*
- [15] ISO 80000-1:2009, *Quantities and units – Part 1: general*
- [16] KAUNE, W.T., et al. Residential magnetic and electric fields. *Bioelectromagnetics*, 1987, vol. 8, p. 315-335.

- [17] KIRKHAM, H., et al. *AC and DC Electric Field Meters Developed for the U.S. Department of Energy*. 1987, no. JPL Publication 87-20.
- [18] KIRSCHVINK, J.L. Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems: improved techniques for the design of bioelectromagnetic experiments. *Bioelectromagnetics*, 1992, vol. 13, no. 5, p. 401-411.
- [19] KOTTER, F.R. AND MISAKIAN, M. *AC transmission line field measurements*. 1977, no. NBS 1549 report prepared for the Department of Energy, available as report 1550 PB82133554 from NTIS, Springfield, VA 22161.
- [20] LENZ, J.E. A review of magnetic sensors. *Proceedings of the IEEE*, 1990, vol. 78, no. 6, p. 973-989.
- [21] MAMISHEV, A.V. AND RUSSELL, B.D. Measurements of magnetic fields in the direct proximity of power line conductors. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1995, vol. 10, no. 3, p. 1211-1216.
- [22] MISAKIAN, M. Calibration of flat 60-Hz electric field probes. *Bioelectromagnetics*, 1984, vol. 5, no. 4, p. 447-450.
- [23] MISAKIAN, M. *Discussion of {Takuma, 1985 #4269}* 1985.
- [24] MISAKIAN, M., et al. *Biological, physical, and electrical parameters for in vitro studies with ELF magnetic and electric fields: a primer*. *Bioelectromagnetics*, 1993, vol. Suppl 2, p. 1-73.
- [25] NISSEN, J. AND PAULSSON, L.E. Influence of field inhomogeneity in magnetic calibration coils. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, vol. 45, no. 1, p. 304-306.
- [26] OLSEN, R.G., et al. Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1988, vol. 3, no. 4, p. 2127-2136.
- [27] PRIMDAHL, F. The fluxgate magnetometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1979, vol. 12, no. 4, p. 241.
- [28] RAMO, S. AND WHINNERY, J.R. *Fields and Waves in Modern Radio*. New York: John Wiley, 1944. p. 141.
- [29] REITZ, J.R. AND MILFORD, F.J. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1960. p. 52.
- [30] SICREE, R.M., et al. Comparison of magnetic flux density meter responses over a database of residential measurements. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1993, vol. 8, no. 2, p. 607-619.
- [31] STRATTON, J.A. *Electromagnetic Theory*. New york: McGraw-Hill, 1941. p. 437.
- [32] TAKUMA, T., et al. Analysis Of Calibration Arrangements For AC Field Strength Meters. Power Apparatus and Systems, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1985, vol. PAS-104, no. 2, p. 488-496.
- [33] VINH, T., et al. Magnetic fields near overhead distribution lines - measurements and estimating technique. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1991, vol. 6, no. 2, p. 912-919.

- [34] WEBER, E. *Electromagnetic Theory*. New York: Dover, 1965. p. 131-133.
 - [35] IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <<http://www.electropedia.org>>
 - [36] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	57
1 Domaine d'application	59
2 Références normatives	60
3 Termes et définitions	60
3.1 Mesureurs	60
3.2 Caractéristiques des mesureurs	62
3.3 Caractéristiques des champs	63
3.4 Mesures	63
4 Symboles	64
5 Spécifications relatives aux instruments	65
5.1 Généralités	65
5.2 Incertitude de mesure	65
5.3 Plage d'amplitudes	66
5.4 Bande passante	66
5.5 Plage de température de fonctionnement et plage d'humidité de fonctionnement	66
5.6 Alimentations en énergie	66
5.7 Lisibilité des échelles de graduation	67
5.8 Dimensions des instruments et choix de la sonde	67
5.8.1 Généralités	67
5.8.2 Mesureur de champ magnétique	68
5.8.3 Mesureur de champ électrique	68
5.8.4 Support de mesureur de champ électrique	68
5.9 Compatibilité électromagnétique	69
5.9.1 Immunité	69
5.9.2 Emission	70
5.10 Facteur de crête	71
5.11 Robustesse	71
5.12 Poids	71
5.13 Choix des instruments	71
6 Etalonnage	72
6.1 Généralités	72
6.2 Procédure d'étalonnage	72
6.2.1 Généralités	72
6.2.2 Système d'étalonnage de champ magnétique	72
6.2.3 Système d'étalonnage de champ électrique	73
6.2.4 Etalonnage des sondes tri-axiales	73
6.2.5 Valeurs d'étalonnage	73
6.2.6 Incertitude d'étalonnage	74
6.3 Documentation d'étalonnage	75
7 Vérification	76
Annexe A (normative) Méthodes d'étalonnage	77
Annexe B (informative) Exemple d'incertitude d'étalonnage	89
Annexe C (informative) Caractéristiques générales des champs magnétiques et électriques	91

Annexe D (informative) Mesureurs d'induction magnétique (mesureurs de champ magnétique).....	96
Annexe E (informative) Mesureurs de champ électrique.....	100
Annexe F (informative) Influence de l'humidité sur la mesure du champ électrique.....	105
Annexe G (informative) Unités.....	107
Bibliographie	108
Figure 1 – Schéma d'un mesureur de champ.....	67
Figure 2 – Trépied isolant et support décalé d'une sonde de champ électrique (photographie RTE).....	69
Figure 3 – Mesure de champ électrique au moyen d'une perche tenue à la main (photographie RTE).....	69
Figure A.1 – Ecart en pourcentage du champ axial calculé [7].....	77
Figure A.2 – Système de coordonnées et géométrie d'une boucle rectangulaire constituée de plusieurs tours de fil (voir l'Equation (A. 1)).....	78
Figure A.3 – Bobines Helmholtz rondes	79
Figure A.4 – Ecart en pourcentage entre la valeur calculée B_z et la valeur centrale (voir l'Equation (A.4))	80
Figure A.5 – Représentation schématique d'un circuit utilisé pour l'étalonnage d'un mesureur de champ magnétique employant une boucle carrée pour produire un champ connu.....	80
Figure A.6 – Schéma relatif à une technique d'injection de tension	82
Figure A.7 – Champ électrique calculé normalisé au niveau des surfaces des plaques et à mi-distance entre les plaques, en fonction de la distance normalisée par rapport aux bords des plaques.....	84
Figure A.8 – Système de plaques parallèles utilisées pour l'étalonnage de mesureurs de champ électrique de type mesureurs d'espace libre	86
Figure A.9 – Configuration de plaques parallèles orientées perpendiculairement au plancher.....	86
Figure A.10 – Schéma relatif à la technique d'injection de courant	88
Figure C.1 – Grandeurs de champs oscillants et tournants pour les cas suivants: polarisation elliptique, polarisation linéaire et polarisation circulaire	92
Figure C.2 – Champ magnétique produit par un courant circulant dans des conducteurs droits et dans des conducteurs circulaires	93
Figure C.3 – Perturbation de la distribution du champ électrique par un individu (extrait de la CEI 62226-3-1)	94
Figure C.4 – Effet de proximité avec une ligne de 25 kV et un bâtiment (extrait de la CEI 62110).....	95
Figure D.1 – Vue schématique d'un simple mesureur de champ magnétique muni d'une bobine.....	96
Figure D.2 – Circuit équivalent approché d'une bobine, lorsque celle-ci est reliée au détecteur	99
Figure E.1 – Formes géométriques des mesureurs de champ électrique mono-axiaux	101
Figure E.2 – Modèles de sondes planes utilisées avec des mesureurs avec référence au sol.....	103
Figure F.1 – Essai dans l'enceinte climatique avec le trépied normal (à gauche) et le trépied décalé (à droite) (photographie R&D de EDF)	105
Figure F.2 – Champ E mesuré en fonction de l'humidité avec un trépied normal	106
Figure F.3 – Champ E mesuré en fonction de l'humidité avec un trépied déporté	106

Tableau 1 – Limites des tensions perturbatrices aux bornes du réseau pour les équipements du groupe 1 de classe B mesurées sur un site d'essai	71
Tableau A.1 – Valeurs du champ électrique calculé normalisé, à mi-distance entre les plaques et à la surface des plaques.....	85
Tableau B.1 – Exemple de calcul d'incertitude	89

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES CONTINUS
ET DE CHAMPS MAGNETIQUES ET ÉLECTRIQUES ALTERNATIFS
DANS LA PLAGE DE FRÉQUENCES DE 1 Hz à 100 kHz DANS LEUR
RAPPORT À L'EXPOSITION HUMAINE –****Partie 1: Exigences applicables aux instruments de mesure**

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 elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à 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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61786-1 a été établie par le comité d'études 106 de la CEI: Méthodes d'évaluation des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques en relation avec l'exposition humaine

Elle a le statut de norme horizontale conformément au Guide 108.

Les premières éditions de la CEI 61786-1 et la CEI 61786-2 remplacent la CEI 61786:1998. La Partie 1 concerne les instruments de mesure, et la Partie 2 concerne les procédures de mesure. Le contenu de la norme a été révisé afin de donner à l'utilisateur des informations à jour et pratiques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
106/292/FDIS	106/298/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 CEI 61786, publiée sous le titre général *Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine*, figure sur le site web de la CEI.

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

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES CONTINUS ET DE CHAMPS MAGNETIQUES ET ÉLECTRIQUES ALTERNATIFS DANS LA PLAGE DE FRÉQUENCES DE 1 Hz à 100 kHz DANS LEUR RAPPORT À L'EXPOSITION HUMAINE –

Partie 1: Exigences applicables aux instruments de mesure

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61786 comporte des lignes directrices concernant les instruments de mesure utilisés pour la mesure des valeurs des champs magnétiques et électriques quasi-statiques avec des composantes fréquentielles comprises entre 1 Hz et 100 kHz ainsi que des champs magnétiques continus, permettant d'évaluer les niveaux d'exposition du corps humain à ces champs.

Parmi les sources de champs figurent des dispositifs qui fonctionnent aux fréquences industrielles et qui produisent des champs à ces fréquences et aux fréquences harmoniques, ainsi que des dispositifs qui produisent des champs dans la plage de fréquence de ce document, incluant les dispositifs qui produisent des champs statiques, et le champ magnétique statique terrestre. Les plages d'amplitudes couvertes par la présente norme vont respectivement de 0,1 μ T à 200 mT en alternatif (1 μ T à 10 T en continu) et de 1 V/m à 50 kV/m pour les champs magnétiques et les champs électriques.

Lorsque des mesures sont effectuées en dehors de cette plage, la plupart des dispositions de la présente norme reste applicable, mais il convient de prêter une attention toute particulière à l'incertitude et à la procédure d'étalonnage spécifiées.

De façon spécifique, la présente norme

- définit la terminologie;
- identifie les exigences relatives aux spécifications pour les mesureurs de champ;
- indique les méthodes d'étalonnage;
- définit les exigences applicables à l'incertitude des instruments;
- décrit les caractéristiques générales des champs;
- décrit les principes de fonctionnement des instruments de mesure;

NOTE Les méthodes de mesure permettant d'atteindre les objectifs définis quant à l'évaluation de l'exposition humaine sont décrites dans la CEI 61786-2.

Les sources d'incertitude pendant l'étalonnage sont également identifiées. En ce qui concerne les mesures de champs électriques, la présente norme considère uniquement la mesure du champ électrique non perturbé en un point de l'espace libre (c'est-à-dire le champ électrique avant l'introduction du mesureur de champ et de l'opérateur) ou sur des surfaces conductrices.

Cette norme horizontale est essentiellement destinée à l'usage des comités d'études dans la préparation des normes, conformément aux principes établis dans le Guide 108 de la CEI.

Une des responsabilités d'un comité d'études est, partout où cela est possible, de se servir des normes horizontales lors de la préparation de ses publications. Le contenu de cette norme horizontale ne s'appliquera pas, à moins qu'il ne soit spécifiquement désigné ou inclus dans les publications concernées.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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 61000-3-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-2: Limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase)*

CEI 61000-4-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux décharges électrostatiques*

CEI 61000-4-3, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-3: Techniques d'essai et de mesure – Section 3: Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques*

CEI 61000-4-4, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-4: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en sèves*

CEI 61000-4-6, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-6: Techniques d'essai et de mesure – Immunité aux perturbations conduites, induites par les champs radioélectriques*

CEI 61000-4-8, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-8: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau*

CISPR 11, *Appareils industriels, scientifiques et médicaux – Caractéristiques de perturbations radioélectriques – Limites et méthodes de mesure*

ISO/CEI Guide 98-3, *Incertitudes de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM: 1995)*

Guide 108, *Lignes directrices pour assurer la cohérence des publications de la CEI – Application des normes horizontales*

3 Termes et définitions

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

NOTE 1 La norme utilise les unités du système international.

NOTE 2 Pour les autres unités, voir l'Annexe G.

NOTE 3 Dans la présente norme, les termes «induction magnétique» et «champ magnétique» seront considérés comme des synonymes.

3.1 Mesureurs

3.1.1

instrument de mesure

dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesures, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes

[SOURCE: CEI 60050-300:2001, 311-03-01]

3.1.2

mesureur de champ

mesureur conçu pour mesurer des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques

Note 1 à l'article: Les mesureurs de champ se composent habituellement de trois parties: la sonde, le circuit du détecteur et le dispositif d'affichage.

3.1.3

sonde

dispositif d'entrée d'un appareil de mesure, formant généralement une unité séparée et connectée à l'appareil au moyen d'un câble flexible, qui transmet le mesurande de façon appropriée

Note 1 à l'article: Une sonde peut être composée d'un ou de plusieurs capteurs.

[SOURCE: CEI 60050-300:2001, 313-09-11, modifiée – une note à l'article a été ajoutée.]

3.1.4

détecteur

dispositif permettant de déceler l'existence ou les variations d'ondes, d'oscillations ou de signaux, habituellement en vue d'extraire les informations représentées. Exemples de détecteurs: détecteur de crête, détecteur de valeur efficace

[SOURCE: CEI 60050-702:1992, 702-09-39, modifiée – les exemples sont différents.]

3.1.5

mesureur d'espace libre

appareil servant à mesurer le champ électrique non perturbé en un point situé au-dessus du sol et qui est soutenu dans l'espace sans contact électrique avec la terre

3.1.6

magnétomètre à noyau saturable

instrument servant à mesurer les champs magnétiques en utilisant les caractéristiques magnétiques non linéaires d'une sonde ou d'un capteur ayant un noyau ferromagnétique

3.1.7

mesureur avec référence au sol

appareil servant à mesurer le champ électrique à la surface du sol, ou près de cette surface, et dont le principe de fonctionnement repose souvent sur la mesure du courant induit ou de la charge induite oscillant entre une électrode isolée et le sol.

Note 1 à l'article: L'électrode isolée est habituellement une plaque située au niveau de la surface du sol ou légèrement au-dessus de celle-ci.

3.1.8

mesureur de contrôle

mesureur de faible poids, alimenté par des batteries, donnant une lecture en temps réel et pouvant être tenu dans la main pour effectuer des mesures de contrôle dans divers endroits

3.1.9

sonde à bobine

capteur d'induction magnétique comprenant une bobine en fil qui produit une tension induite proportionnelle à la dérivée temporelle du champ magnétique

3.1.10

sonde à effet Hall

capteur d'induction magnétique contenant un élément qui utilise l'effet Hall pour produire une tension proportionnelle à l'induction magnétique

3.2 Caractéristiques des mesureurs

3.2.1

facteur de crête

rapport de la valeur absolue maximale à la valeur efficace d'une grandeur alternative

[SOURCE: : IEC 60050-103:2009, 103-14-57, modifiée – la note de la définition originale a été supprimée.]

3.2.2

diaphonie

apparition d'une énergie indésirable dans une voie de transmission, liée à la présence d'un signal dans une autre voie et due par exemple à une induction, une conduction ou des effets non linéaires

[SOURCE: CEI 60050-722:1992, 722-15-03]

3.2.3

réponse en fréquence

pour un système linéaire avec une variable d'entrée sinusoïdale en régime établi, rapport du phaseur de la variable de sortie au phaseur de la variable d'entrée correspondante, représenté en fonction de la pulsation ω

[SOURCE: CEI 60050-351:2006, 351-24-33, modifiée – la note à la définition originale a été supprimée.]

3.2.4

isotropie de la sonde

une mesure du degré auquel la réponse d'une sonde de champ est indépendante de la polarisation et de la direction de propagation du champ incident

3.2.5

bande passante

bande de fréquences dans toute laquelle l'affaiblissement reste inférieur à une valeur spécifiée

[SOURCE: CEI 60050-151:2001, 151-13-52]

3.2.6

moyenne quadratique

valeur efficace

1) pour n grandeurs $x_1, x_2, \dots, x_n$, racine carrée positive de la valeur moyenne de leurs carrés:

$$X_q = \left[\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

2) pour une grandeur x fonction de la variable t , racine carrée positive de la valeur moyenne du carré de la grandeur prise sur un intervalle donné $[t_0, t_0+T]$ de la variable

$$X_q = \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t)]^2 dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

Note 1 à l'article: la valeur moyenne quadratique d'une grandeur périodique est généralement prise sur un intervalle d'intégration dont l'étendue est le produit de la période par un nombre entier naturel.

[SOURCE: CEI 60050-103:2009,103-02-02, modifiée – la deuxième note à la définition originale a été supprimée.]

3.3 Caractéristiques des champs

3.3.1

champ non perturbé

champ qui existerait en un point, en l'absence de personnes ou d'objets mobiles

3.3.2

champ presque uniforme

champ dans un espace où le champ résultant ne varie pas de plus de 1% sur la section transversale de la sonde

3.3.3

champ quasi statique

champ qui satisfait à la condition $f \ll \frac{c}{l}$ (c.-à-d. longueur d'onde $\gg l$) où f est la fréquence du

champ, c est la vitesse de la lumière et l est une dimension caractéristique de la géométrie de mesure, par exemple la distance entre la source de champ et le point de mesure

Note 1 à l'article: Les champs magnétiques et électriques à la fréquence industrielle, à proximité de lignes d'alimentation d'énergie et d'appareils électriques, constituent des exemples de champs quasi statiques.

3.3.4

champ résultant

champ donné par l'expression

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3)$$

où F_x , F_y , et F_z sont les valeurs efficaces des trois composantes orthogonales du champ,

ou par l'expression

$$F_R = \sqrt{F_{\max}^2 + F_{\min}^2} \quad (4)$$

où $F_{\max}$ et $F_{\min}$ sont les valeurs efficaces respectives du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse du champ.

Note 1 à l'article: Le champ résultant F_R est toujours $\geq F_{\max}$. Si le champ est polarisé linéairement, $F_{\min} = 0$ et $F_R = F_{\max}$. Si le champ est polarisé circulairement, $F_{\max} = F_{\min}$ et $F_R \approx 1,41 F_{\max}$.

3.4 Mesures

3.4.1

facteur de correction

facteur numérique par lequel on multiplie le résultat brut d'un mesurage pour compenser une erreur connue

Note 1 à l'article: Puisque l'erreur connue ne peut être déterminée parfaitement, la compensation ne peut être complète.

3.4.2

facteur d'élargissement

facteur numérique utilisé comme un coefficient multiplicateur de l'incertitude type composée afin d'obtenir une incertitude élargie

Note 1 à l'article: Pour une grandeur z décrite par une distribution normale avec une espérance mathématique μ_z et un écart-type σ , l'intervalle $\mu_z \pm k\sigma$ englobe 68,27 %, 95,45 % et 99,73 % de la distribution pour un facteur d'élargissement $k = 1, 2$, et 3 , respectivement.

3.4.3

facteur d'échelle

facteur par lequel la lecture de l'instrument est multipliée pour obtenir sa grandeur d'entrée

3.4.4

incertitude type

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

3.4.5

incertitude d'étalonnage

paramètre, associé au résultat d'un étalonnage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande

Note 1 à l'article: L'incertitude d'étalonnage comprend généralement plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesures et peuvent être caractérisées par des écarts-types expérimentaux. Les estimations d'autres composantes peuvent être fondées sur l'expérience ou sur d'autres informations.

4 Symboles

a	= rayon de la sonde à bobine; rayon d'une sonde de champ électrique sphérique
$2a, 2b$	= dimensions des côtés d'une bobine rectangulaire
$\mathbf{B}$	= vecteur d'induction magnétique
B_0	= amplitude de champ magnétique alternatif
B_R	= champ magnétique résultant
B_z	= induction magnétique axiale
C	= capacité parasite d'une sonde à bobine
d	= espacement de plaques parallèles; distance par rapport à la source de champ électromagnétique; espacement des bobines Helmholtz
$\mathbf{D}$	= vecteur de déplacement électrique
E	= champ électrique
E_0	= champ électrique uniforme
$F_{\max}, F_{\min}$	= valeurs efficaces du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse d'un champ électrique
I	= courant circulant dans des bobines de champ magnétique
L	= inductance d'une sonde à bobine
N	= nombre de spires (système de bobine de champ magnétique)
Q	= charge induite
r	= distance entre une source de champ magnétique et un point de mesure; résistance d'une sonde à bobine et de conducteurs
R	= impédance d'entrée approximative d'un circuit détecteur (mesureur de champ magnétique); rayon des bobines Helmholtz
S	= surface d'électrode (mesureur de champ électrique)
t	= temps
T	= période de signal périodique
V	= tension
Z	= impédance dans un circuit d'injection de courant

ε_0	=	permittivité de l'espace libre
λ	=	longueur d'onde
μ_0	=	perméabilité de l'espace libre
ϕ	=	flux magnétique
ω	=	pulsation de champ alternatif

5 Spécifications relatives aux instruments

5.1 Généralités

Dans le cadre des mesures de champ visant à évaluer l'exposition humaine, les points suivants sont considérés ci-dessous:

- mesure du champ électrique résultant;
- mesure du champ électrique non perturbé.

NOTE 1 D'autres points peuvent se révéler nécessaires en fonction de l'objectif de la mesure.

Les divers types d'instruments disponibles pour caractériser des champs magnétiques quasi-statiques sont décrits à l'article D.1.

Les divers types d'instruments disponibles pour caractériser des champs magnétiques statiques sont décrits à l'article D.3.

Divers types de mesureurs de champ magnétique sont d'usage courant, par exemple les mesureurs de champ munis de sondes inductives, les mesureurs munis de sondes à effet Hall, et les mesureurs associant deux bobines à un noyau ferromagnétique, comme dans le cas d'un magnétomètre à noyau saturable.

NOTE 2 Les sondes à effet Hall sont capables de capter aussi bien des inductions magnétiques statiques que des inductions magnétiques à variation temporelle. En raison de leur sensibilité limitée et des problèmes de saturation rencontrés lorsqu'on tente de mesurer des inductions magnétiques de faible niveau à la fréquence industrielle en présence d'un champ géomagnétique statique d'importance appréciable, les sondes à effet Hall ont rarement été utilisées pour mesurer des champs magnétiques de lignes d'alimentation en courant alternatif.

Les divers types d'instruments disponibles pour caractériser des champs électriques quasi-statiques sont décrits à l'article E.1. La présente norme considère les deux types suivants de mesureurs de champ électrique:

- a) le mesureur d'espace libre;
- b) le mesureur avec référence au sol.

Les instruments doivent être accompagnés d'une quantité d'informations suffisante, y compris les spécifications relatives aux instruments et d'une notice d'instructions clairement rédigée, pour permettre aux utilisateurs de déterminer la conformité à la présente norme, pour les aider à faire fonctionner correctement le mesureur de champ, et pour évaluer l'utilité du dispositif en vue d'une application par l'utilisateur. Les spécifications relatives aux instruments qui doivent être fournies et /ou satisfaites sont indiquées ci-après.

5.2 Incertitude de mesure

L'incertitude de mesure de l'instrument de mesure doit être spécifiée par le fabricant de l'instrument. L'incertitude de mesure doit être déterminée suivant la ISO/CEI Guide 98-3. L'incertitude doit être spécifiée comme une incertitude de mesure élargie en appliquant un facteur d'élargissement de 2. L'incertitude est valide après avoir appliqué les facteurs de correction disponibles. L'incertitude doit comprendre toutes les composantes applicables lorsque l'instrument est utilisé dans un champ presque uniforme. Ces composantes peuvent comprendre l'incertitude d'étalonnage, la réponse en fréquence, les écarts du gain dans les différents paramètres de l'étendue de mesure, l'isotropie de la sonde, sources de bruit

internes, la non linéarité, la stabilité, la réponse en fonction de la température et de l'humidité. L'incertitude liée à l'instrument ne comprend pas les effets dus à la manipulation de l'instrument comme par exemple le positionnement de la sonde dans un champ non uniforme, ou l'influence de la personne effectuant la mesure sur le champ à mesurer. Ces composantes doivent être considérées comme des incertitudes supplémentaires dans le rapport de mesure.

NOTE 1 A la fréquence industrielle, l'incertitude liée aux instruments de mesure est généralement de 10 % ou mieux.

NOTE 2 Des exemples de recommandations sur la manière de traiter les incertitudes d'étalonnage sont donnés dans l'Annexe B.

5.3 Plage d'amplitudes

La plage d'amplitudes pour laquelle l'instrument fonctionne dans les limites de l'incertitude spécifiée doit être clairement indiquée.

5.4 Bande passante

Les instruments de mesure à large bande dans la plage de fréquence alternative ont toujours une fréquence de coupure inférieure et supérieure qui définit une bande passante. En règle générale, les limites de bande passante sont définies par le point à moins 3 dB de la réponse en fréquence. La réponse en fréquence nominale d'un instrument peut être décrite comme la réponse en fréquence d'un système avec un filtre passe-haut et un filtre passe-bas connectés en série. Il convient de spécifier les types de filtre et leurs ordres (par exemple, filtre Butterworth passe-haut du troisième ordre et filtre Butterworth passe-bas du cinquième ordre). La réponse en fréquence nominale de l'instrument n'est généralement pas considérée comme une source d'incertitude de mesure du fait que l'effet de limitation de bande des filtres constitue une propriété souhaitée de l'instrument dans le cas de mesures à large bande. Pour les mesures sélectives de fréquence (par exemple, FFT), l'effet de limitation de bande n'est pas souhaité et il convient de corriger automatiquement la réponse en fréquence nominale. L'incertitude de mesure d'un instrument résultant des tolérances de fabrication est généralement plus importante aux limites de bande qu'aux fréquences moyennes. Par conséquent, l'incertitude de mesure d'un instrument est souvent spécifiée également et parfois uniquement dans une plage de fréquences limitée. Cette plage n'est pas aussi large que la bande passante mais il convient qu'elle soit suffisamment large pour couvrir toutes les fréquences étudiées. Dans la plage de fréquence limitée, l'influence de la réponse en fréquence nominale doit être négligeable.

5.5 Plage de température de fonctionnement et plage d'humidité de fonctionnement

Les plages de température et d'humidité relative, pour lesquelles l'instrument fonctionne dans les limites de l'incertitude spécifiée, ne doivent pas être inférieures aux plages comprises entre -10 °C et 45 °C et entre 5 % et 95 %, respectivement. Il convient d'éviter des variations brutales de température susceptibles de produire de la condensation dans l'instrument.

La mesure du champ électrique peut être perturbée si l'humidité relative est supérieure à 70 % du fait de l'effet de condensation sur la sonde et le support [2]¹. Dans la mesure où l'effet de l'humidité dépend du mesureur de champ, il convient de vérifier le bon fonctionnement du mesureur de champ dans ces conditions avant de procéder aux mesures (voir l'Annexe F).

5.6 Alimentations en énergie

Il est recommandé d'utiliser des appareils de mesure qui fonctionnent avec une alimentation par batterie interne.

Si des batteries (ou piles) sont utilisées, il convient de prévoir un moyen pour indiquer si l'état de la batterie permet un fonctionnement correct du mesureur de champ. Il convient que les instruments utilisés pour enregistrer l'exposition personnelle puissent fonctionner pendant au

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

moins 8 h dans les limites de l'incertitude assignée, avant qu'il soit nécessaire de remplacer ou de recharger les batteries.

Si les batteries utilisées sont rechargeables, il est recommandé de ne pas faire fonctionner les instruments alors qu'ils sont reliés au chargeur. Lorsque de tels raccordements sont nécessaires, il convient de démontrer que les champs parasites provenant du chargeur de batterie, les perturbations conduites provenant de la tension du réseau et les couplages électromagnétiques établis par l'intermédiaire des conducteurs de raccordement (au chargeur de batterie) n'affectent pas la mesure (voir 5.9).

Il ne doit y avoir aucune liaison filaire avec des mesureurs d'espace libre de champ électrique.

Si les batteries utilisées dans les mesureurs d'exposition sont des batteries à enveloppes ferromagnétiques, il est nécessaire de veiller à ce que les enveloppes n'influencent pas de façon significative les lectures faites par l'instrument (voir la CEI 61786-2 pour de plus amples informations sur les sources d'incertitude de mesure).

5.7 Lisibilité des échelles de graduation

Il convient, le cas échéant, que le dispositif d'affichage du mesureur soit numérique.

Des dispositifs d'affichage distants doivent être utilisés afin d'éviter la perturbation du champ électrique par l'observateur.

Il convient que les dimensions des afficheurs numériques des mesureurs de champ magnétique soient suffisamment grandes pour permettre une lecture facile lorsque l'appareil est tenu à bout de bras. Si plusieurs plages de sensibilité sont prévues, il convient d'indiquer la valeur à pleine échelle du calibre choisi, et il convient que les unités soient facilement interprétables. Pour ce qui est des instruments à sélection automatique du calibre, la plage d'amplitudes peut être indiquée ailleurs, par exemple dans la notice d'utilisation. Il convient que les instruments indiquent clairement les unités affichées.

5.8 Dimensions des instruments et choix de la sonde

5.8.1 Généralités

La Figure 1 illustre le schéma général d'un mesureur.

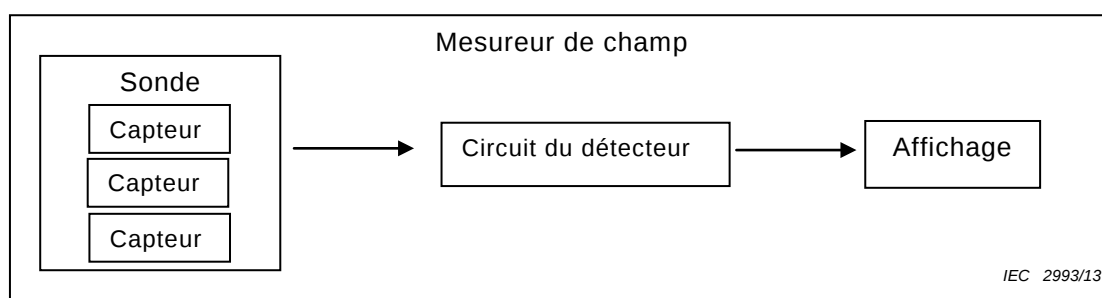


Figure 1 – Schéma d'un mesureur de champ

Il convient que les sondes soient tri-axiales.

NOTE Il est possible d'utiliser des sondes mono-axiales pour mesurer les valeurs efficaces des demi-grands axes de l'ellipse du champ en faisant varier l'orientation de la sonde jusqu'à obtenir une lecture maximale. Les mesureurs mono-axiaux peuvent également servir à déterminer le champ magnétique résultant en mesurant les valeurs efficaces de trois composantes spatiales orthogonales et en les combinant entre elles selon l'Equation (3). On suppose que, durant cette procédure, il n'y a aucune variation significative des valeurs efficaces des composantes spatiales. L'utilisation de sondes mono-axiales est appropriée aux mesures de champ électrique référencées à la surface conductrice.

5.8.2 Mesureur de champ magnétique

Il convient de fournir les dimensions du mesureur.

Il convient que la taille des sondes soit adaptée à la variation spatiale du champ mesuré. Les sondes doivent avoir une surface égale ou inférieure à $0,01 \text{ m}^2$. Avec des sondes tri-axiales, les trois capteurs peuvent être concentriques ou, si la taille des capteurs est inférieure à $0,05 \text{ m}$, il convient de les placer aussi près que possible les uns des autres. La dimension maximale de l'espace contenant les trois capteurs associés ne doit pas être supérieure à $0,2 \text{ m}$.

Il convient que les sondes à bobine aient une section transversale circulaire ou carrée; des petits écarts par rapport à ces formes, comme par exemple lorsque des bobines concentriques se croisent entre elles, sont admis.

Etant donné que la tension induite est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'induction magnétique, il est nécessaire que le circuit du détecteur contienne un étage intégrateur destiné à restituer la forme d'onde de l'induction magnétique.

Les emplacements et les orientations des capteurs contenus dans les boîtiers des mesureurs de champ magnétique doivent être clairement indiqués sur l'instrument ou dans la notice d'utilisation.

5.8.3 Mesureur de champ électrique

Il convient d'indiquer dans la documentation du fabricant les dimensions des mesureurs de champ électrique en fonction du type de mesureur:

- a) mesureur d'espace libre: les dimensions maximales de l'enveloppe contenant la sonde ne doivent pas dépasser $0,2 \text{ m}$;
- b) mesureur avec référence au sol: dimensions de la sonde et longueur du câble coaxial de liaison.

5.8.4 Support de mesureur de champ électrique

Le support du mesureur de champ électrique doit être constitué en un matériau isolant, comme un matériau synthétique ou composite.

La dimension du support dépend de la manière dont la sonde est soutenue:

- Sonde soutenue par un trépied isolant = 1 m (Figure 2);
- Sonde soutenue au bout d'une perche de longueur 2 m , tenue à la main par une personne debout (Figure 3).



IEC 2994/13

Figure 2 – Trépied isolant et support décalé d'une sonde de champ électrique (photographie RTE)



IEC 2995/13

Figure 3 – Mesure de champ électrique au moyen d'une perche tenue à la main (photographie RTE)

5.9 Compatibilité électromagnétique

5.9.1 Immunité

a) Champ électrique à fréquence industrielle

Les instruments, destinés à être utilisés au voisinage d'équipements sous haute tension fonctionnant à des fréquences industrielles, ne doivent pas être affectés de manière significative par des champs électriques ambiants pouvant atteindre 20 kV/m, c'est-à-dire que l'influence du champ électrique sur la lecture du champ magnétique doit être inférieure à 0,2 μ T. Il est possible que cette exigence d'immunité soit augmentée pour certains environnements extrêmes dans lesquels il peut y avoir des champs électriques atteignant 100 kV/m, par exemple à proximité des conducteurs de lignes de transport sous haute tension.

Les essais relatifs à l'immunité aux champs électriques à fréquences industrielles peuvent être effectués à l'aide des systèmes de plaques parallèles décrits à l'article A.2.

NOTE 1 L'effet de proximité de l'utilisateur de l'instrument peut atténuer ou accentuer le champ électrique, selon la géométrie du champ et la position du mesureur de champ magnétique par rapport à l'utilisateur. Pour ce qui concerne l'effet de proximité de l'utilisateur pendant l'essai de champ électrique, voir la CEI 61786-2.

b) Champ magnétique à fréquence industrielle

Les instruments, destinés à être utilisés au voisinage d'équipements sous haute tension fonctionnant à des fréquences industrielles, ne doivent pas être affectés de manière significative par des champs magnétiques ambiants pouvant atteindre 1 mT, c'est-à-dire que l'influence du champ magnétique sur la lecture du champ électrique doit être inférieure à 10 V/m. Les instruments doivent être soumis aux essais en procédant conformément aux méthodes décrites dans la CEI 61000-4-8.

Il est possible d'effectuer les essais relatifs à l'immunité aux champs électriques à fréquences industrielles à l'aide des systèmes de bobines décrits à l'article A.1.

c) Champs électromagnétiques rayonnés

Le fonctionnement des instruments ne doit pas être affecté par un rayonnement électromagnétique aux fréquences définies dans la CEI 61000-4-3 pour un champ électrique de 3 V/m efficace pour les fréquences comprises entre 80 MHz et 2 GHz, et 1 V/m efficace pour les fréquences supérieures.

Les essais des instruments doivent être effectués conformément aux méthodes décrites dans la CEI 61000-4-3.

NOTE 2 Dans la CEI 61000-4-3:2006+A2:2010 la plage de fréquences est comprise entre 80 MHz et 6 GHz pour couvrir des radiofréquences telles que celles d'installations de radiodiffusion, radiocommunication, GSM, Wifi, etc.

Le fonctionnement des instruments ne doit pas être affecté par un rayonnement électromagnétique compris entre 150 kHz et 80 MHz. Les essais doivent être effectués conformément aux méthodes décrites dans la CEI 61000-4-6 à une tension de 3 V efficaces. Les instruments doivent continuer à fonctionner normalement au cours des deux essais décrits ci-dessus.

Il n'est pas nécessaire de soumettre aux essais décrits dans la CEI 61000-4-6 les équipements qui fonctionnent avec des batteries (dimension $< \lambda/4$), qui n'ont aucune liaison avec la terre ni avec aucun autre équipement (non isolé) et qui ne seront pas utilisés pendant le chargement des batteries.

NOTE 3 Il peut être nécessaire d'augmenter les exigences d'immunité dans certaines conditions, par exemple lorsqu'on effectue des mesures à proximité d'antennes de radiodiffusion et de téléphones mobiles.

d) Immunité aux transitoires

Il faut également vérifier par essai que les spécifications relatives aux instruments utilisés pour effectuer des mesures et branchés sur le réseau d'alimentation soient conformes aux exigences de la CEI 61000-4-4 (transitoires électriques rapides) pour une tension de crête de 2 kV au niveau de l'entrée de l'alimentation alternative (interface du mesureur de champ avec la source d'alimentation externe ou avec prise de courant murale alternatif). Une dégradation temporaire des performances au cours de l'essai est acceptable, à condition que les performances reviennent automatiquement à leur niveau normal.

e) Décharges électrostatiques (DES)

Pendant la plupart des mesures effectuées, on ne prévoit pas les décharges électrostatiques subies par les instruments ou générées par ceux-ci. Cependant, les connecteurs des instruments doivent pouvoir supporter une tension de contact ou de décharge d'au moins 2 kV et doivent être contrôlés par essai conformément aux méthodes décrites dans la CEI 61000-4-2. Aucune dégradation des performances ne doit être observée.

5.9.2 Emission

a) Emission harmonique

L'émission d'harmonique des instruments ayant une puissance assignée supérieure ou égale à 50 W doit être limitée conformément aux exigences de la CEI 61000-3-2, classe A.

NOTE Les équipements à fonctionnement sur batterie sont considérés comme satisfaisant aux exigences.

b) Perturbations conduites – 0,15 MHz à 30 MHz (instruments reliés à une alimentation en courant alternatif)

Les perturbations conduites doivent être inférieures aux limites définies dans le Tableau 1 en fonction de la fréquence (voir CISPR 11, Tableau 3).

Tableau 1 – Limites des tensions perturbatrices aux bornes du réseau pour les équipements du groupe 1 de classe B mesurées sur un site d'essai

Bande de fréquences MHz	Quasi-crête dB(μV)	Valeur moyenne dB(μV)
0,15 – 0,50	66 Décroît linéairement jusqu'à 56 en même temps que le logarithme de la fréquence	56 Décroît linéairement jusqu'à 46 en même temps que le logarithme de la fréquence
0,50 – 5	56	46
5 – 30	60	50
A la fréquence de transition, la limite la plus sévère doit s'appliquer.		

Les essais relatifs aux instruments doivent être effectués en procédant conformément aux méthodes décrites dans le CISPR 11.

c) Perturbations rayonnées – 30 MHz à 1 000 MHz

Les émissions électromagnétiques provenant d'instruments contenant des dispositifs fonctionnant à des fréquences de 9 kHz ou plus doivent être limitées aux valeurs ci-après (voir CISPR 11, Tableau 5, limites des perturbations de rayonnement électromagnétique pour les équipements du groupe 1 de classe B mesurées sur un site d'essai à 10 m).

Quasi-crête: 30 dB (μV/m) à 10 m (30 MHz à 230 MHz)

Quasi-crête: 37 dB (μV/m) à 10 m (230 MHz à 1 000 MHz)

Les essais relatifs aux instruments doivent être effectués en procédant conformément aux méthodes décrites dans le CISPR 11.

5.10 Facteur de crête

Le système de mesure doit mesurer correctement la valeur efficace vraie du champ, même lorsque le facteur de crête du champ magnétique est 3.

NOTE Dans la pratique, de nombreux champs présentent un facteur de crête élevé et celui-ci peut entraîner une saturation indésirable dans les étages amplificateurs du détecteur.

5.11 Robustesse

Le mesureur et les autres composants du système doivent être suffisamment robustes pour supporter les vibrations et les chocs subis lors du transport. L'utilisation d'une mallette de transport est souhaitable. Les instruments doivent être conformes à la classe de stockage 1M2, à la classe de transport 2M3 et à la classe de fonctionnement 7M3 de la CEI 60721-3.

5.12 Poids

Il convient de fournir le poids des instruments. Il convient que le poids des instruments portatifs soit maintenu aussi faible que possible pour permettre l'utilisation manuelle des instruments dans des conditions limites, par exemple dans certains environnements industriels.

Il convient que le poids des mesureurs de champ électrique d'espace libre soit maintenu aussi faible que possible pour permettre de tenir facilement l'instrument par une perche isolante d'une longueur de 2 m.

5.13 Choix des instruments

Il convient de choisir l'instrument de mesure en fonction des procédures de mesure et notamment pour les informations nécessaires dans le rapport de mesure.

Il convient de choisir un mesureur de champ approprié en fonction des caractéristiques du champ.

6 Etalonnage

6.1 Généralités

Les systèmes de mesure doivent être soumis à des étalonnages pendant toute leur durée de vie. Il faut assurer la traçabilité de tous les étalonnages effectués à partir des étalons nationaux et internationaux via une chaîne ininterrompue d'étalonnages, tous ayant des incertitudes spécifiées.

Les trois méthodes d'étalonnage du champ magnétique suivantes sont couvertes par la présente norme:

- a) étalonnage par introduction de la sonde du mesureur de champ dans un champ magnétique calculable (après avoir mesuré les dimensions des bobines et l'intensité du courant circulant dans les bobines);
- b) étalonnage utilisant une technique d'injection de tension;
- c) étalonnage par comparaison avec un système de mesure de référence.

La première méthode est la plus utilisée et est détaillée dans l'article 6.2.2. Les deux autres méthodes sont décrites en détail dans l'Annexe A.

La présente norme s'applique à la méthode suivante d'étalonnage de champ électrique:

- étalonnage par introduction de la sonde du mesureur de champ dans un champ électrique calculé (système de plaques parallèles).

6.2 Procédure d'étalonnage

6.2.1 Généralités

Il convient de suivre dans tous les cas les procédures de la présente section, si approprié.

Il faut procéder à l'étalonnage à intervalles réguliers. Il convient de prendre un intervalle initial de douze mois. Cet intervalle peut être modifié en fonction de la dérive de la réponse du mesureur de champ entre les étalonnages et également en fonction des conditions d'utilisation.

6.2.2 Système d'étalonnage de champ magnétique

Pendant l'étalonnage des plages d'amplitudes plus élevées (c'est-à-dire des plages qui ne sont pas influencées de façon significative par le bruit de fond du champ magnétique) la sonde doit être placée dans un champ presque uniforme généré par un système de bobines (voir A.1). Chacun des axes des capteurs doit coïncider à tour de rôle avec l'axe du système de bobines et le plus grand écart de champ par rapport à la valeur centrale doit être inférieur à 1 % sur toute la section transversale de la sonde.

Des informations concernant des champs générés par des systèmes de boucles rectangulaires, carrées et circulaires (y compris des bobines de Helmholtz) sont données en [7], [18], [28], [34] et A.1. Par exemple l'induction magnétique produite par une seule boucle carrée (composée de plusieurs tours de fil) de 1 m × 1 m remplira la condition d'uniformité pour une sonde ayant un diamètre de 0,10 m (voir A.1). Il est possible d'augmenter ou de réduire la taille de la boucle respectivement pour des sondes de plus grandes dimensions ou des sondes de plus faibles dimensions, afin de maintenir le niveau d'uniformité indiqué à travers la sonde. Il est également possible de procéder à l'étalonnage en utilisant la technique d'injection de tension ou en comparant les résultats obtenus avec ceux d'un mesureur de champ magnétique de référence (voir A.1).

Il est possible de déroger à l'exigence concernant l'uniformité du champ pendant l'opération d'étalonnage, pour des sondes de grande dimension utilisées pour déterminer des valeurs moyennes de champs non uniformes et/ou pour des applications dans lesquelles les exigences relatives à la résolution spatiale ne sont pas considérées comme très importantes. Dans ce

cas, il convient que le plus grand écart du champ étalon par rapport à la valeur centrale soit $\leq 1,5 \%$ sur toute la section transversale de la sonde. Par exemple, le champ produit par une boucle carrée de $1,3 \text{ m} \times 1,3 \text{ m}$ répondra à cette exigence d'uniformité pour une sonde ayant un diamètre de $0,20 \text{ m}$.

Des étalonnages de chacun des trois axes des mesureurs de champ tri-axiaux doivent être effectués en utilisant des champs magnétiques sinusoïdaux ou leurs tensions équivalentes (technique d'injection de tension), aux niveaux et aux fréquences indiqués par les spécifications des instruments. Le courant traversant les bobines d'étalonnage doit être pratiquement exempt de composantes harmoniques (distorsion harmonique totale $< 1 \%$).

6.2.3 Système d'étalonnage de champ électrique

Au cours de la procédure d'étalonnage, la sonde du mesureur de champ doit être placée dans un champ presque uniforme produit par des plaques parallèles en fonction du type de mesureur, comme décrit en l'Article A.2. L'écart du champ au centre des plaques parallèles par rapport à la valeur du champ uniforme, c'est-à-dire le champ produit par des plaques parallèles à l'infini, doit être inférieur à 1% (voir l'Article A.2). La distance séparant les plaques parallèles doit être suffisante pour éviter les effets de proximité lorsque la sonde du mesureur de champ est introduite entre les plaques (voir l'Article A.2). Par exemple, des mesureurs d'espace libre, de dimensions diagonales inférieures à $0,23 \text{ m}$, peuvent être étalonnés au centre de l'espace de $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$, séparant les plaques parallèles. Les dimensions des plaques parallèles peuvent être augmentées ou réduites, selon qu'il s'agit respectivement de mesureurs d'espace libre de plus grandes ou de plus petites dimensions. Chacun des axes des capteurs doit coïncider à tour de rôle avec la direction du champ électrique.

NOTE Il est possible d'étalonner la sonde fixée au support généralement utilisée pour les mesures mais pas sur les 3 axes de la sonde (dans ce cas, la dimension des plaques doit être de 2 m en hauteur et à l'horizontal) – l'autre solution consiste à étalonner la sonde seule sur les 3 axes.

L'étalonnage des mesureurs mono-axiaux et de chacun des trois axes des mesureurs de champ tri-axiaux doit être effectué en utilisant des champs électriques sinusoïdaux aux niveaux et aux fréquences indiqués par les spécifications des instruments.

Les alimentations électriques permettant la mise sous tension des plaques parallèles doivent délivrer des tensions qui soient pratiquement exemptes (distorsion harmonique totale $\leq 2 \%$) de composantes harmoniques. Lorsque cela n'est pas possible, il convient d'enregistrer le taux d'harmoniques et de démontrer que l'influence des composantes harmoniques sur les résultats de l'étalonnage est négligeable.

6.2.4 Etalonnage des sondes tri-axiales

Lors de l'étalonnage de chacun des axes des sondes tri-axiales, il faut vérifier l'isotropie des sondes ainsi que la diaphonie entre les circuits du détecteur de chaque capteur. Il convient que la configuration de la sonde tri-axiale et du champ soit telle que l'axe de chaque capteur puisse être successivement aligné avec la direction du champ. Pour chaque alignement des capteurs, il convient de mesurer la valeur fournie par les deux capteurs restants et il convient que cette valeur soit inférieure à 3% du signal provenant du capteur aligné.

NOTE 1 Il est également possible de contrôler l'étalonnage des mesureurs de champ à l'aide de sondes tri-axiales pour une orientation (à une fréquence et à un niveau de champ) lorsque toutes les bobines sont traversées par pratiquement le même flux.

NOTE 2 Pour les instruments tri-axiaux qui ne fournissent que la valeur résultante du champ, ceci peut être réalisé en plaçant l'instrument le long des trois axes et en vérifiant la valeur de sortie résultante.

6.2.5 Valeurs d'étalonnage

En ce qui concerne les mesureurs à dispositif d'affichage analogique, il convient d'enregistrer au moins trois niveaux de champ pour chaque calibre de mesure du mesureur de champ, compris entre 30% et 90% de la pleine échelle. Pour les mesureurs à dispositif d'affichage

numérique, il convient d'obtenir au moins un point pour couvrir de 10 % à 90 % de la pleine échelle.

Pour les essais des différents calibres de mesure, il peut être nécessaire d'appliquer la méthode d'injection.

En ce qui concerne les instruments à sélection automatique du calibre, il convient de les étalonner sur chaque calibre de mesure, en au moins un point représentatif compris dans le calibre.

Pour un niveau de champ, il convient d'effectuer les étalonnages à trois fréquences qui couvrent la bande passante, c'est-à-dire à la fréquence la plus élevée, à la fréquence la plus faible, et à une fréquence intermédiaire.

Pendant l'étalonnage, le rapport signal/bruit doit être suffisamment élevé. Dans le cas contraire, ceci doit être pris en compte dans l'incertitude d'étalonnage.

Il convient que la fréquence de résonance de la boucle d'étalonnage soit largement supérieure aux fréquences d'étalonnage afin que les étalonnages ne soient pas affectés par le phénomène de résonance (voir l'Article A.1).

Il faut réduire, au point de les rendre négligeables (voir l'Article A.1), les perturbations du champ étalon dues aux courants – images dans les plans de masse voisins et aux effets de proximité de matériaux ferromagnétiques.

6.2.6 Incertitude d'étalonnage

L'incertitude d'étalonnage doit être déterminée selon le Guide ISO/CEI 98.3

Le champ dans le système d'étalonnage doit être connu avec une incertitude inférieure à $\pm 3 \%$ (facteur d'élargissement 1).

Pour le champ magnétique, l'amplitude peut être déterminée par un calcul effectué à partir des mesures des dimensions des bobines, du nombre de spires dans la ou les bobines, et de l'intensité du courant dans les bobines (voir l'Article A.1), ou par mesure directe en utilisant un mesureur d'induction magnétique de référence étalonné avec une incertitude de mesure suffisamment faible. Si la technique d'injection de tension est utilisée en tant que partie intégrante de la procédure d'étalonnage (voir l'Article A.1), l'induction magnétique équivalente est déterminée par la tension injectée.

Pour le champ électrique, l'amplitude peut être déterminée par un calcul effectué à partir des mesures de l'espace séparant les plaques parallèles et de tension (voir l'Article A.2), ou par une mesure directe en utilisant un mesureur de champ électrique de référence étalonné avec une incertitude de mesure suffisamment faible.

L'incertitude de l'étalonnage sera déterminée par des facteurs tels que l'incertitude dans la valeur du champ dans le système d'étalonnage ($\pm 3 \%$), ou l'incertitude dans la tension injectée, la résolution dans la lecture de l'instrument soumis à l'essai, et la variation de la lecture si l'instrument soumis à l'essai est placé à plusieurs reprises dans le système d'étalonnage. D'autres facteurs tels que le bruit de fond ambiant de champ magnétique peuvent aussi compromettre l'incertitude de l'étalonnage. L'incertitude totale du procédé d'étalonnage (facteur d'élargissement 1) ne doit pas être supérieure à $\pm (5 \% + 10 \text{ nT ou } 1 \text{ V/m})$. Il faut utiliser un facteur d'élargissement de 2 lors de la spécification de l'incertitude de mesure étendue, c'est-à-dire que, dans ce cas, l'incertitude de mesure étendue devrait être $\leq \pm (10 \% + 20 \text{ nT ou } 2 \text{ V/m})$. Il faut assurer la traçabilité de l'étalonnage par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux. Des recommandations sur la manière de traiter toutes les incertitudes et une liste de sources d'incertitude sont respectivement données en l'article 5.2 et un exemple est donné en Annexe B.

6.3 Documentation d'étalonnage

Dans le cadre de l'élaboration du certificat d'étalonnage, il convient de traiter les points suivants, en plus des données relatives aux spécifications des instruments (voir 5.2 à 5.12). Chaque certificat d'étalonnage doit comprendre au moins les renseignements suivants, sauf spécifications contraires dûment justifiées par le laboratoire:

- un titre (par exemple, "Certificat d'étalonnage");
- le nom et l'adresse du laboratoire, ainsi que le lieu de réalisation des étalonnages s'il est différent de l'adresse du laboratoire;
- l'identification unique du certificat d'étalonnage (telle que le numéro de série), et sur chaque page, une identification permettant de la considérer comme faisant partie intégrante du certificat d'étalonnage ainsi qu'une marque claire de la fin du certificat;
- le nom et l'adresse du client;
- l'identification de la méthode ou de la norme utilisée;
- une description et une identification univoque du ou des éléments étalonnés ainsi que leur état;
- la date de réception du ou des éléments d'étalonnage lorsque ceci est critique pour la validité et l'application des résultats, et la ou les dates de réalisation de l'étalonnage.
- la référence aux procédures utilisées par le laboratoire lorsque ceci est pertinent pour la validité ou l'application des résultats.
- les résultats de l'étalonnage avec, le cas échéant, les unités de mesure;
- le ou les noms, fonctions et signatures ou identification équivalente de la ou des personnes délivrant le certificat d'étalonnage.

Il convient également que les fabricants des instruments fournissent des documents décrivant leurs procédures d'étalonnage et indiquant tous les renseignements suivants, selon le cas applicable:

- la géométrie et les dimensions des bobines de champ magnétique;
- la fréquence de résonance du système de bobines;
- les instruments de mesure du courant délivré au système de bobines; l'incertitude des instruments; la date de la dernière vérification de l'étalonnage;
- les instruments utilisés pour mesurer la tension (technique d'injection de tension, voir l'Article A.1); l'incertitude des instruments; la date de la dernière vérification de l'étalonnage;
- le rapport du diviseur de tension (technique d'injection de tension, voir l'Article A.1); la variation du rapport de division en fonction de la fréquence; l'incertitude sur la valeur du rapport de division;
- les dimensions des plaques parallèles et la séparation;
- les instruments de mesure de la tension délivrée aux plaques parallèles; l'incertitude des instruments; la date de la dernière vérification de l'étalonnage;
- l'incertitude du système de mesure de référence; les dimensions des sondes; la bande passante; la date de la dernière vérification de l'étalonnage.

Il convient de tenir ces renseignements à la disposition des clients sur simple demande de leur part. Il convient que les laboratoires d'essai soient également conformes aux exigences ci-dessus, selon le cas applicable.

Note De plus amples informations et recommandations sur le certificat d'étalonnage sont données au 5.10 de l'ISO/CEI 17025:2005 [36].

7 Vérification

La vérification consiste à simplement vérifier la fonctionnalité du mesureur de champ, procédure qu'il convient de réaliser avant d'utiliser le mesureur. La vérification comprend les éléments suivants:

- état de la batterie;
- accessoires requis;
- inspection visuelle;
- date d'étalonnage.

Annexe A (normative)

Méthodes d'étalonnage

A.1 Etalonnage des mesureurs d'induction magnétique

A.1.1 Méthode par génération de champ magnétique

L'étalonnage d'un mesureur de champ magnétique est normalement effectué en introduisant la sonde dans un champ magnétique presque uniforme, d'amplitude et de direction connues. Il est possible de produire des champs magnétiques connus en utilisant des systèmes de bobines de formes circulaires et rectangulaires [1], [7], [18], [25], [34]. Par exemple, on a souvent utilisé des bobines de Helmholtz pour générer de tels champs. La Figure A.1 [7] fait une comparaison entre l'uniformité de champs produits par des bobines carrées et circulaires uniques et des bobines de Helmholtz carrées et circulaires. La Figure A.1 indique l'écart du champ magnétique axial, en pourcentage, en fonction d'une distance normalisée par rapport à l'axe de chaque système de bobines, où la distance est indiquée suivant une coordonnée cartésienne (voir Figure A.2 pour le cas d'une boucle carrée unique). La distance est donnée comme un pourcentage du rayon pour les bobines circulaires et comme un pourcentage de la moitié de la dimension du côté pour les bobines carrées.

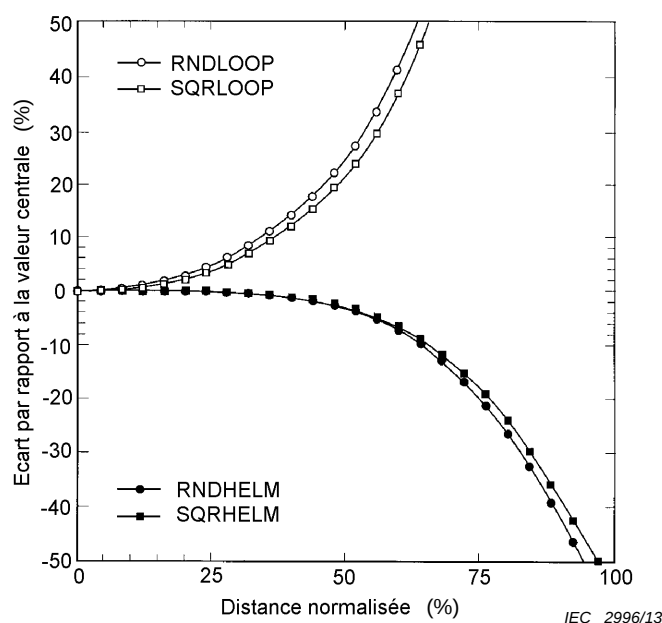


Figure A.1 – Ecart en pourcentage du champ axial calculé [7]

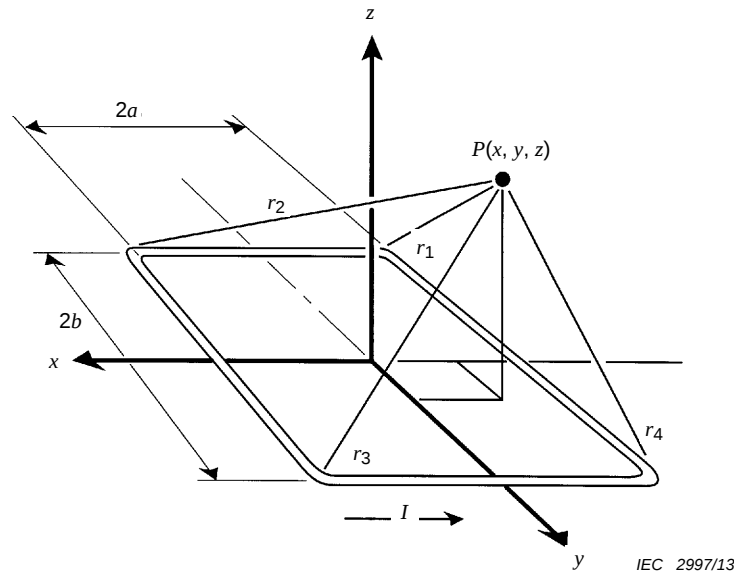


Figure A.2 – Système de coordonnées et géométrie d'une boucle rectangulaire constituée de plusieurs tours de fil (voir l'Equation (A. 1))

Une boucle unique, composée de plusieurs tours de fil, ayant une forme rectangulaire, et utilisée pour produire le champ est décrite ci-après, parce que les équations permettant de calculer le champ en tous points de l'espace sont définies [19],[34] et que le système de bobines est simple à réaliser. La simplicité de la construction entraîne une réduction de l'uniformité du champ, mais elle permet toutefois d'obtenir facilement une uniformité suffisante pour les besoins de l'étalonnage.

La composante z de l'induction magnétique produite par une boucle rectangulaire $2a \times 2b$ en un point situé dans l'espace $P(x,y,z)$ est donnée par l'expression [19],[34]

$$B_z = \frac{\mu_0 I N}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} - \frac{C_\alpha}{r_\alpha (r_\alpha + d_\alpha)} \right] \quad (\text{A.1})$$

où

N est le nombre de spires;

$$C_1 = -C_4 = a + x;$$

$$C_2 = -C_3 = a - x;$$

$$d_1 = d_2 = b + y;$$

$$d_3 = d_4 = y - b;$$

$$r_1 = [(a + x)^2 + (b + y)^2 + z^2]^{1/2};$$

$$r_2 = [(a - x)^2 + (b + y)^2 + z^2]^{1/2};$$

$$r_3 = [(a - x)^2 + (b - y)^2 + z^2]^{1/2};$$

$$r_4 = [(a + x)^2 + (b - y)^2 + z^2]^{1/2};$$

I est la valeur efficace du courant en ampères;

μ_0 est la perméabilité de l'air;

x, y et z sont les coordonnées indiquées à la Figure A.2.

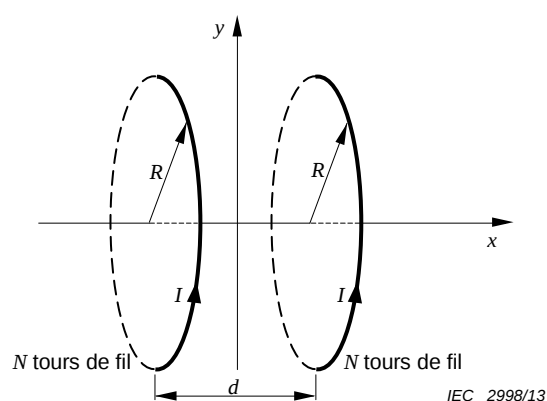


Figure A.3 – Bobines de Helmholtz rondes

Le champ magnétique sur l'axe des bobines de Helmholtz rondes de rayon R est donné par

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \left(1 + \frac{\left(x + \frac{d}{2} \right)^2}{R^2} \right)^{-\frac{3}{2}} + \frac{\mu_0 NI}{2R} \left(1 + \frac{\left(x - \frac{d}{2} \right)^2}{R^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \quad (\text{A.2})$$

N = nombre de spires

I = courant

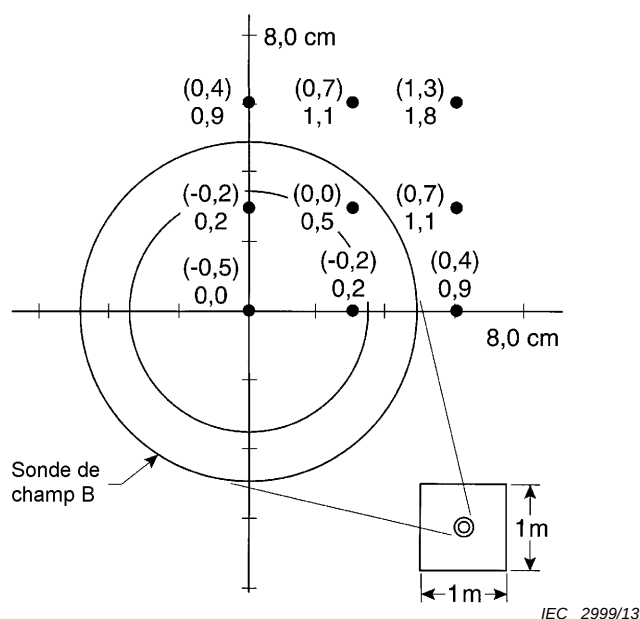
Pour $R = d$ et $x = 0$,

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{5^{\frac{3}{2}} R} \quad (\text{A.3})$$

La dérivation de l'Equation (A.1) suppose que les conducteurs dans la boucle de courant ont des sections transversales négligeables. On l'exprime, à titre indicatif

$$B_z = \frac{\mu_0 IN \sqrt{2}}{\pi a} \quad (\text{A.4})$$

au centre d'une boucle carrée ayant des côtés de dimension $2a$. L'Equation (A.1) a servi à calculer les valeurs de champ au centre et à proximité d'une boucle carrée ayant des dimensions de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. L'écart en pourcentage par rapport à la valeur du champ magnétique central en des points localisés dans le plan de la boucle et dans des plans situés à 0,03 m au-dessus et au-dessous du plan de la boucle (entre parenthèses) sont illustrés à la Figure A.4. La Figure A.4 illustre également le dessin à l'échelle d'une sonde de champ magnétique de 0,10 m de diamètre. L'écart du champ magnétique par rapport à la valeur centrale, sur toute la section transversale de la sonde de 0,10 m de diamètre, est inférieur à 1 %. La Figure A.5 donne une vue schématique de la sonde, de la boucle d'étalonnage carrée et du circuit associé utilisé pour l'alimentation des bobines.



La figure montre un dessin à l'échelle d'une bobine de 0,10 m de diamètre.

Figure A.4 – Ecart en pourcentage entre la valeur calculée B_z et la valeur centrale (voir l'Equation (A.4))

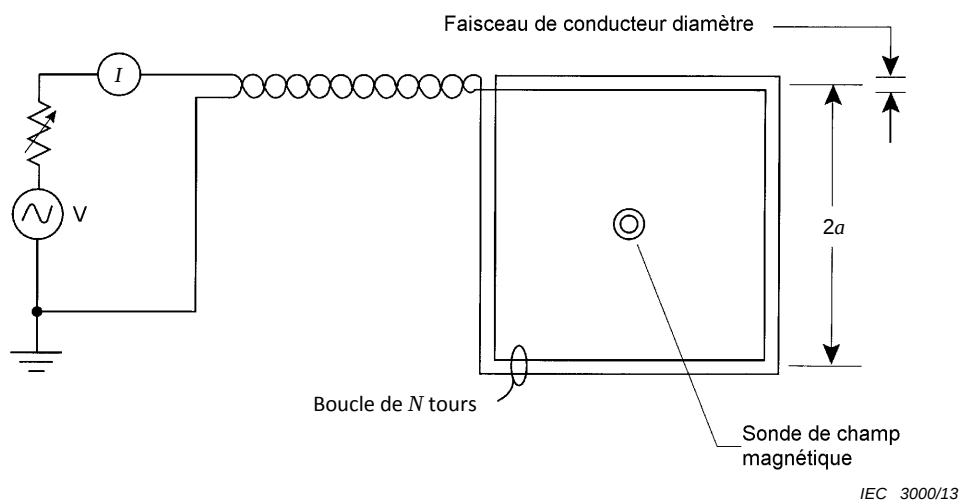


Figure A.5 – Représentation schématique d'un circuit utilisé pour l'étalonnage d'un mesureur de champ magnétique employant une boucle carrée pour produire un champ connu

NOTE L'incertitude (facteur d'élargissement 1) dans la valeur du champ étalon est déterminée par les incertitudes associées au calcul de B_z . Par exemple, dans le cas d'une boucle carrée 1 m × 1 m (voir Figures A.4 et A.5), l'incertitude est due aux incertitudes sur le courant de mesure I , la dimension des côtés de la boucle, et l'effet de la non-uniformité du champ magnétique ($< 0,5 \%$ pour une sonde de 0,10 m de diamètre). L'incertitude liée à la dimension du côté de la boucle carrée peut être due à la section transversale non négligeable du faisceau de conducteurs. La dimension du côté de la boucle peut être considérée comme la distance entre les centres des faisceaux de conducteurs avec une incertitude égale à $\pm$ le «diamètre» du faisceau de conducteurs (voir Figure A.5). L'incertitude composée sur la valeur de l'induction magnétique est donnée par la racine carrée de la somme des carrés. Si, par exemple, des incertitudes dans la détermination de I et de la dimension du côté sont respectivement $\pm 0,2 \%$ et $\pm 1,0 \%$, l'incertitude composée dans la valeur du champ étalon pour la sonde de 0,10 m de diamètre est $\pm [(0,2)^2 + (1,0)^2 + (0,5)^2]^{1/2}$ ou $\pm 1,1 \%$ (facteur d'élargissement 1).

Il est évident qu'un mesureur de champ muni d'une sonde à bobine indique la valeur du champ magnétique, qui est une valeur moyenne sur toute la section transversale de la sonde. La différence entre cette valeur moyenne et la valeur centrale [voir Equation (A.4)] sera inférieure à l'écart maximal en pourcentage par rapport à la valeur centrale. Par exemple, lorsque le plus grand écart du champ magnétique par rapport à la valeur centrale est de 0,63 % pour la sonde de 0,10 m (dans le plan de la boucle), le champ moyen est supérieur de seulement 0,31 % à la valeur centrale (champ étalon).

Il est possible d'obtenir l'Equation des champs magnétiques produits par deux bobines carrées, en utilisant l'Equation (A.1) et le principe de superposition [24]. La condition nécessaire pour des bobines de Helmholtz carrées est d'avoir un espacement entre les bobines égal à $0,5445 \times 2a$, où $2a$ est la dimension du côté [6].

En faisant varier la fréquence du courant à travers la boucle, il est possible de déterminer la réponse en fréquence du mesureur de champ pour la plage de fréquences concernée. Pour un détecteur convenablement conçu et muni d'un étage d'intégration, il convient qu'un mesureur de champ muni d'une bobine sans matériau magnétique indique une valeur efficace presque constante lorsqu'on fait varier la fréquence (voir l'Article A.1, dernier alinéa, pour les effets de la fréquence de résonance de la bobine d'étalonnage). Il convient d'obtenir un résultat similaire avec une sonde de bobine ayant un noyau en matériau ferromagnétique doux si la variation de la perméabilité en fonction de la fréquence est négligeable.

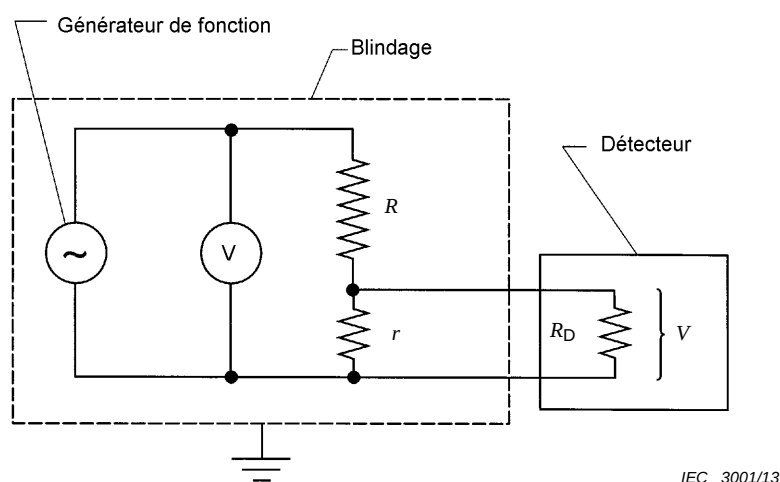
L'étalonnage des calibres supérieurs d'un mesureur de champ magnétique, c'est-à-dire $> 10 \mu\text{T}$, peut normalement être effectué avec un champ produit par un système de bobines, parce que le bruit de fond ambiant de champ magnétique qui est typiquement égal ou inférieur à $0,1 \mu\text{T}$ contribue de façon négligeable au champ étalon. Cependant, la présence du bruit de fond ambiant de champ magnétique est susceptible de compromettre l'étalonnage des calibres les plus sensibles, en raison de son effet perturbateur sur le champ étalon. Une procédure alternative pour étalonner les calibres sensibles est d'utiliser la technique d'injection de tension [8].

A.1.2 Méthode d'injection de tension

La technique d'injection de tension peut s'avérer également utile lors de l'étalonnage de mesureurs pour des valeurs de champs très élevées, par exemple supérieures à 10 mT, lorsque la production de tels champs par un système de bobines pose des problèmes d'ordre technique.

NOTE En raison des contraintes introduites par la conception de l'instrument, il est possible que la méthode d'étalonnage par injection de tension ne soit applicable que pendant la phase de conception ou pendant la phase de fabrication du mesureur de champ.

Cette procédure permet de déterminer les volts/tesla produits par une bobine (lorsqu'elle est reliée au circuit du détecteur) à chaque fréquence étudiée, en utilisant un voltmètre relié à l'entrée du détecteur et un champ magnétique qui est supérieur, par au moins deux ordres de grandeur, au bruit de fond de champ magnétique. Des tensions correspondant à des champs magnétiques faibles sont alors injectées dans le circuit du détecteur (après avoir déconnecté la sonde) pour étalonner les échelles les plus sensibles du mesureur. Il est possible d'utiliser un diviseur de tension ayant un rapport connu lorsqu'il est relié au détecteur, une source de tension alternative (par exemple un générateur de fonctions), un voltmètre précis et un blindage de champ électrique pour injecter les tensions connues pour la plage de fréquences étudiée [8]. Pour effectuer l'étalonnage, il convient également de connaître l'évolution du rapport de division vis-à-vis de la fréquence. La Figure A.6 donne une vue schématique d'un circuit d'injection de tension relié au détecteur.



La tension V , produite par un générateur de fonctions, est réduite pour les besoins de l'injection par un diviseur résistif. La tension injectée v est donnée par $Vr/(R+r)$ quand la fréquence n'influence pas le rapport du diviseur. R et r sont des résistances, où R est habituellement beaucoup plus grand que r . L'impédance d'entrée du détecteur est approximée comme une résistance R_D . La relation $r \ll R_D$ doit être satisfaite pour éviter d'affecter de façon significative le rapport du diviseur.

Figure A.6 – Schéma relatif à une technique d'injection de tension

Il est possible que la technique d'injection de tension ne soit pas applicable à des sondes à noyaux ferromagnétiques parce que la perméabilité du noyau peut varier en fonction de l'induction magnétique et affecter la sensibilité de la sonde (volts/tesla). Il convient de noter que la technique d'injection de tension peut également être utilisée comme un moyen pour vérifier l'étalonnage de toutes les plages du mesureur de champ magnétique.

A.1.3 Comparaison avec le mesureur de champ magnétique de référence

Il existe une troisième méthode pour étalonner des instruments qui consiste à comparer les lectures du mesureur de champ avec celles d'un mesureur de champ magnétique de référence, qui a été préalablement étalonné dans un champ magnétique connu et/ou par la technique d'injection de tension. Avec cette méthode, les valeurs de champ, déterminées avec chaque sonde du mesureur de champ mono-axial et tri-axial, sont comparées à des mesures obtenues avec le mesureur de champ de référence dans le même champ magnétique (produit par un système de bobines). On suppose que (1) les dimensions des mesureurs de l'instrument subissant l'étalonnage et celles de l'instrument de référence sont comparables ou que l'uniformité du champ est suffisamment grande pour que les effets de moyenne engendrés par les mesureurs (sur toutes leurs sections transversales) ne diffèrent pas de façon significative, (2) la bande passante du mesureur de champ subissant l'étalonnage est comparable à celle du mesureur de référence, et (3) le bruit de fond ambiant de champ magnétique (typiquement instable) ne contribue pas de façon significative au champ étalon. Les comparaisons sont effectuées aux niveaux de champ et aux fréquences considérés.

D'autre part, le mesureur de champ magnétique de référence peut servir à vérifier l'étalonnage d'un système de bobines utilisé à des fins d'étalonnage.

NOTE 1 La comparaison entre les lectures du mesureur de champ magnétique et les valeurs du champ étalon permet de déterminer des facteurs de correction qu'il convient d'appliquer aux lectures lors des mesures. Ou bien, les comparaisons permettent des ajustements correctifs dans le circuit du détecteur. Dans les deux cas, l'incertitude associée aux procédés d'étalonnage ci-dessus est égale à l'incertitude de mesure dans la valeur du champ étalon (une fois les corrections effectuées) combinée à des incertitudes liées à la stabilité et à la résolution des lectures du mesureur de champ.

Des perturbations du champ étalon peuvent être produites par l'image des boucles de courant dans des plans du sol situés à proximité. Par exemple, lorsque le plan d'une boucle carrée est parallèle à un sol *parfait*, la perturbation du champ au centre de la boucle est de 2 % et 0,3 %

respectivement pour des distances égales à une fois et à deux fois le côté de la boucle carrée. La perturbation est réduite lorsque le plan de la boucle est perpendiculaire au plan du sol, par exemple la perturbation pour la boucle carrée est de 0,3 % lorsque le côté de la boucle est éloigné du plan du sol d'une distance égale au côté de la boucle. La perturbation du champ étalon est moindre pour des bobines de Helmholtz carrées [7].

Des perturbations du champ étalon peuvent également se produire à cause de matériaux ferromagnétiques au voisinage immédiat de la boucle d'étalonnage. Par exemple, la présence de matériaux ayant une perméabilité élevée, tels que de l'acier dans une armoire ou dans un pupitre situé à proximité, ou la présence d'un élément de fixation métallique sous une table, concentre le flux magnétique et est susceptible de perturber la valeur du champ calculé dans la boucle d'étalonnage. Il convient de vérifier l'influence des matériaux ferromagnétiques situés à proximité sur le champ étalon en utilisant une méthode empirique, par exemple l'influence d'un panier de relais situé à proximité sur le champ magnétique pourrait être étudiée en fonction de la distance par rapport à la bobine d'étalonnage.

Il convient d'effectuer les étalonnages à des fréquences bien distinctes de la fréquence de résonance du système de bobines. En raison de la capacité parasite entre les fils des bobines, le circuit équivalent du système de bobines peut être grossièrement modélisé sous la forme d'une inductance et d'une capacité montées en parallèle. Aux fréquences de résonance et au voisinage de celles-ci, des quantités significatives de courant traversant les bobines sont shuntées par la capacité parasite et ne contribuent donc pas à la production du champ magnétique. Il existe une méthode pour déterminer la fréquence de résonance d'un système de bobines, qui consiste à mesurer la tension aux bornes de la bobine en fonction de la fréquence, en maintenant constant le courant délivré aux bobines. A des fréquences bien distinctes de la fréquence de résonance, la tension augmente de manière linéaire. Au voisinage de la fréquence de résonance, l'impédance du système de bobines et la valeur mesurée de la tension associée deviennent non linéaires et augmentent plus rapidement.

NOTE 2 Une analyse spécifique est nécessaire pour déterminer une limite supérieure de fréquence de fonctionnement des bobines d'étalonnage.

A.2 Etalonnage des mesureurs de champ électrique

A.2.1 Méthode par génération de champ électrique

A des fins d'étalonnage, des champs électriques presque uniformes peuvent être générés au moyen de plaques parallèles, à condition que les dimensions des plaques soient suffisamment grandes par rapport à l'espace séparant les plaques [1] [13], [32]. Si l'on ignore les effets de bords, la valeur du champ électrique uniforme E_0 est donnée par V/d où V est la différence de potentiel appliquée entre les plaques et d est l'espace séparant les plaques. Afin d'aider à la détermination des dimensions des plaques parallèles, on trace la courbe des variations des amplitudes du champ électrique calculé E , normalisées par rapport au champ uniforme (E/E_0) à la surface des plaques et à mi-distance entre les plaques, en fonction de la distance normalisée x/d à partir du bord de la plaque, comme illustré à la Figure A.7. Des valeurs numériques sont présentées au Tableau A.1.

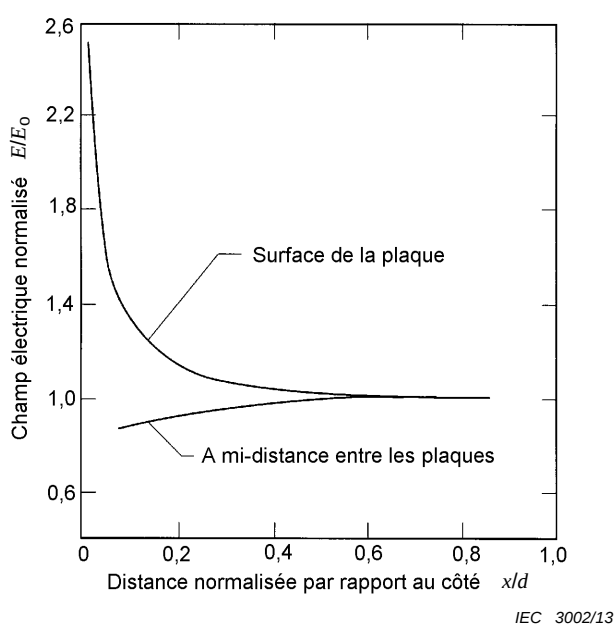


Figure A.7 – Champ électrique calculé normalisé au niveau des surfaces des plaques et à mi-distance entre les plaques, en fonction de la distance normalisée par rapport aux bords des plaques

Les résultats figurant au Tableau A.1 montrent que l'écart sur l'uniformité du champ, dû aux effets de bord, décroît jusqu'à 0,1 % à une distance par rapport au bord, égale à l'espacement entre les plaques. En ce qui concerne les plaques carrées de dimensions finies, l'influence des effets de bord, pour l'ensemble des quatre bords, peut être estimée en utilisant le principe de superposition lorsque l'effet par rapport à un bord est inférieur à 0,1 %. Les calculs numériques du champ, entre des plaques parallèles de dimensions finies, suggèrent un écart de 0,04 % lorsqu'on utilise cette méthode [32]. Ces résultats sont valables en l'absence de perturbations provenant de plans du sol situés à proximité. Des calculs et des mesures [19] , [32] indiquent que la mise sous tension des plaques parallèles, au moyen d'un transformateur à point milieu, permet d'obtenir un champ qui est moins sensible aux perturbations provoquées par des plans de sol situés à proximité.

La Figure A.8 illustre un système de plaques parallèles qui s'est avéré adéquat pour étalonner des mesureurs d'espace libre présentant des dimensions diagonales inférieures à 0,23 m [13]. Pour réaliser les plaques parallèles, on utilise des feuilles métalliques ou un écran métallique fortement tendu sur des cadres de 1,5 m × 1,5 m, et un écartement de 0,75 m. Les plaques sont mises sous tension par un ensemble constitué d'un générateur de fonctions, d'un amplificateur de puissance et d'un transformateur, sachant que des résistances de limitation de courant adéquates sont placées aux bornes de sortie du transformateur par mesure de sécurité [3]. Par exemple, des résistances de 10 MΩ et plus, prévues pour des tensions assignées adéquates, sont efficaces jusqu'à 10 kV (c'est-à-dire $E \approx 13$ kV/m). Lorsque les travaux sont effectués en présence de hautes tensions, il convient de respecter les consignes de sécurité normalement en usage dans les laboratoires utilisant des hautes tensions. Un champ étalon compris dans des limites de 1 % par rapport à la valeur du champ uniforme V/d est produit au centre du système de plaques parallèles décrit plus haut (il convient de combiner les incertitudes dans les valeurs de V et d avec le taux de 1 %). Le mesureur d'espace libre, muni de la poignée isolante normalement utilisée pendant les mesures, est placé au centre du système de plaques parallèles.

Pour éviter des perturbations significatives des distributions de charges superficielles sur les plaques parallèles, dues à la présence du mesureur de champ, il convient que la plus grande dimension diagonale du mesureur ne soit pas supérieure à 0,23 m [23]. En outre, il convient que la distance séparant les plaques parallèles du plan du sol le plus proche (murs, plancher,

etc.) soit au moins égale à un espacement entre plaques. Le système de plaques parallèles peut être réduit ou augmenté, selon qu'il s'agit respectivement de mesureurs de plus grandes dimensions ou de mesureurs de plus petites dimensions.

NOTE Si un effet couronne se produit au niveau des bords des plaques parallèles, il est possible de l'éliminer en fixant des tubes métalliques le long des bords pour réduire le champ électrique superficiel.

Il est possible de déterminer la réponse en fréquence d'un mesureur de champ en variant la fréquence de la tension délivrée aux plaques parallèles.

Tableau A.1 – Valeurs du champ électrique calculé normalisé, à mi-distance entre les plaques et à la surface des plaques

A mi-distance entre les plaques	
x/d	E/E_0
0,069 8	0,837
0,162 1	0,894
0,296 5	0,949
0,417 7	0,975
0,682 1	0,995
0,793 4	0,997
1,000 0	0,999
Surfaces des plaques	
1,000 0	1,001
0,795 4	1,002
0,686 1	1,005
0,437 6	1,025
0,243 1	1,095
0,162 4	1,183
0,123 0	1,265
0,099 1	1,342
0,082 9	1,414
0,045 2	1,732
0,030 7	2,000
0,018 5	2,449

Si la distance entre la plaque inférieure et le plancher est inférieure à un espacement entre plaques, la configuration conçue pour mettre sous tension les plaques parallèles illustrée à la Figure A.8 peut être modifiée de sorte que la plaque inférieure soit au potentiel de la terre.

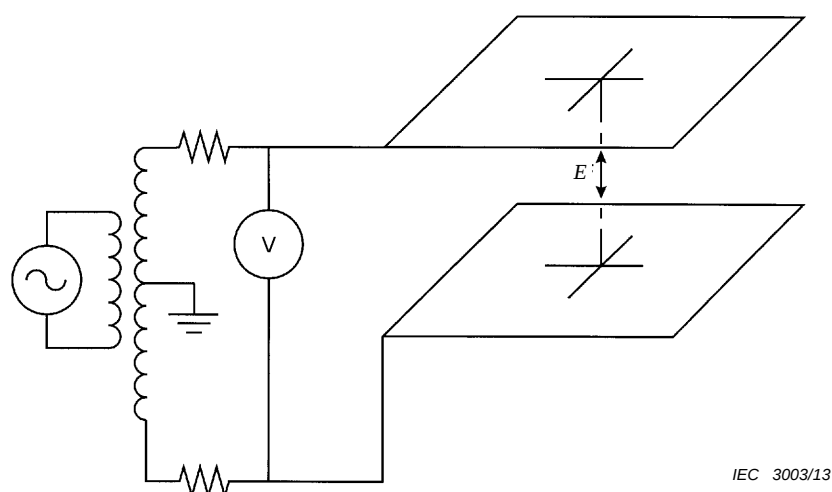


Figure A.8 – Système de plaques parallèles utilisées pour l'étalonnage de mesureurs de champ électrique de type mesureurs d'espace libre

Outre le fait d'orienter les plaques parallèlement au plancher, la configuration illustrée à la Figure A.8 peut également être utilisée pour orienter les plaques perpendiculairement au plancher.

A noter qu'il convient que la distance par rapport au plancher, au plafond et aux murs soit toujours supérieure à un espacement entre plaques. L'orientation perpendiculaire des plaques facilite la fixation d'un support isolant dans le plan du potentiel nul entre les deux plaques, comme l'illustre la Figure A.9.

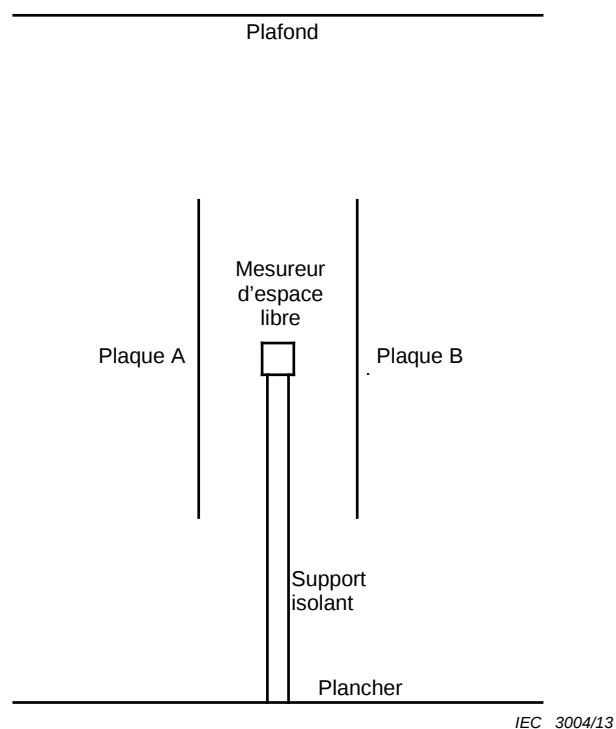


Figure A.9 – Configuration de plaques parallèles orientées perpendiculairement au plancher

Pour étalonner des mesureurs de champ de type mesureur avec référence au sol, le montage utilisé pour mettre sous tension les plaques parallèles, tel qu'illustré à la Figure A.8, est

modifié de telle sorte que la plaque inférieure se trouve au potentiel de la terre et qu'elle serve de support à la sonde plate.

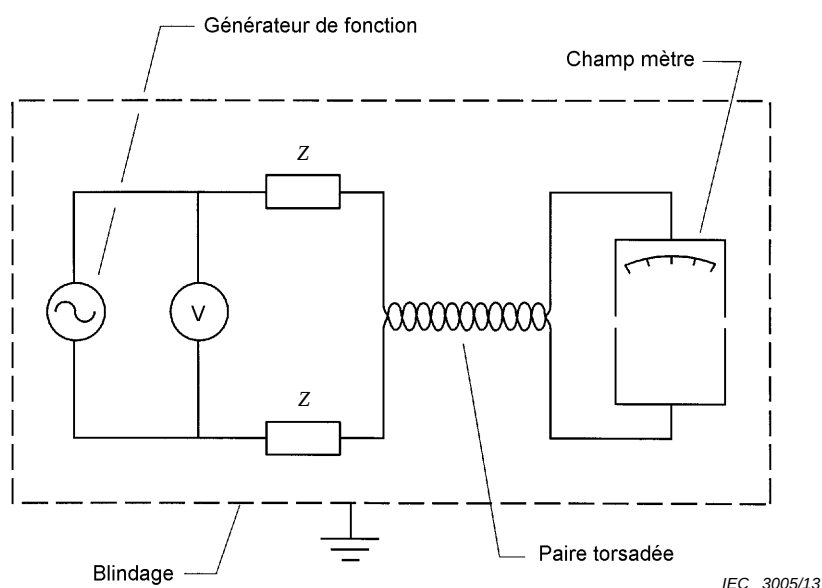
En raison de la distance plus importante entre la sonde et la plaque supérieure, la perturbation de distribution des charges superficielles sur la plaque supérieure par la sonde est considérablement réduite (par rapport à des mesureurs d'espace libre placés à mi-distance entre les plaques). Cette perturbation plus faible permet de réduire l'espacement entre les plaques parallèles précédemment indiqué (0,75 m) et, de ce fait, permet d'augmenter l'extension latérale de la région du champ presque uniforme (se reporter à la Figure A.7 et au Tableau A.1). Il convient que la distance entre les plaques parallèles ne soit pas supérieure à 1,5 fois la dimension de la sonde et que la distance entre la sonde et n'importe quel bord de la plaque inférieure ne soit pas inférieure à deux fois la distance entre les plaques. Il convient que la distance séparant les plaques parallèles du plan du sol le plus proche (murs, plancher, etc.) soit supérieure au double de la distance séparant les deux plaques. Il convient que la largeur de la bande de garde soit au moins égale à 6 % de la dimension du côté et que l'épaisseur de la sonde ne soit pas supérieure à 3,5 % de la dimension de son côté. Avec les limitations indiquées plus haut, la valeur du champ étalon est égale, avec une tolérance de 0,5 %, à la valeur du champ uniforme, V/d (il convient de combiner les incertitudes dans les valeurs de V et d avec les 0,5 %) [22].

NOTE Des comparaisons entre les lectures du mesureur de champ électrique et les valeurs du champ étalon permettent de déterminer des facteurs de correction qu'il convient d'appliquer aux lectures lors des mesures. Ou bien, les comparaisons permettent des ajustements correctifs dans le circuit du détecteur. Dans les deux cas, l'incertitude associée aux procédés d'étalonnage ci-dessus est égale à l'incertitude dans les valeurs du champ étalon (une fois les corrections effectuées) combinée à des incertitudes liées à la stabilité et à la résolution des lectures du mesureur de champ.

A.2.2 Méthode d'injection de courant

Les mesureurs d'espace libre et les mesureurs avec référence au sol, dans leur réponse initiale à un champ électrique, peuvent être considérés comme des mesureurs de courant². Par conséquent, si le rapport du courant induit au champ électrique, I/E , pour un mesureur de champ électrique, est déterminé par étalonnage, il est possible d'utiliser ultérieurement une méthode d'injection de courant comme un moyen permettant de vérifier l'étalonnage des instruments, si on ne dispose pas de plaques parallèles [19]. La Figure A.10 montre un circuit pouvant servir à injecter des courants connus dans les électrodes actives d'un mesureur de type mesureur d'espace libre. Dans la Figure A.10, V est la tension produite par un générateur de fonctions et Z est une impédance connue supérieure d'au moins deux ordres de grandeur à l'impédance d'entrée du mesureur de champ. Bien que Z puisse être réalisé à l'aide de condensateurs et de résistances, il est préférable d'utiliser des résistances, car l'impédance des condensateurs varie si l'on utilise la technique d'injection de courant à différentes fréquences. De plus, si la source de tension contient des harmoniques, des erreurs plus petites seront introduites par l'utilisation de résistances. Le courant injecté peut être calculé à partir de la loi d'Ohm.

² Par la suite, s'il y a une étape d'intégration dans le circuit du détecteur, la lecture du capteur de champ est proportionnelle à la charge induite qui suit la forme d'onde du champ électrique.



Bien que Z puisse représenter des condensateurs ou des résistances, l'utilisation de résistances est recommandée (voir texte en l'Article A.2).

Figure A.10 – Schéma relatif à la technique d'injection de courant

Il est possible d'utiliser un circuit similaire à celui illustré à la Figure A.10 pour injecter des courants dans des mesureurs de champ de type mesureurs avec référence au sol. Dans ce cas, on supprime l'impédance du côté terre de la source de tension et on double la valeur de l'impédance restante.

Lorsque la technique d'injection de courant est employée, il est nécessaire d'utiliser un blindage approprié pour minimiser les contributions des signaux provenant de sources telles que des appareils d'éclairage et des appareils électriques situés à proximité. Le fait de protéger le circuit d'injection de courant et le mesureur de champ par un écran métallique mis à la terre peut réduire, au point de les rendre négligeables, les contributions des signaux provenant de sources parasites. La validité de la méthode d'injection de courant suppose que le rapport I/E est déterminé aussitôt après l'étalonnage du mesureur de champ dans un champ électrique connu et que la sonde du mesureur de champ n'a subi aucune modification depuis son étalonnage.

A.2.3 Comparaison avec le mesureur de champ électrique de référence

La méthode est identique à celle décrite en A.1.3.

Annexe B (informative)

Exemple d'incertitude d'étalonnage

Le tableau B.1 donne un exemple de calcul de l'incertitude d'étalonnage du champ B au moyen d'un système de bobines de Helmholtz. On suppose un champ magnétique de 100 μT . Les sources d'incertitude proviennent de l'analyse du système d'étalonnage décrit à l'Annexe A.

Tableau B.1 – Exemple de calcul d'incertitude

Sources d'incertitude	Référence	Valeur de l'incertitude uv_i	Distribution de probabilité	Facteur de division k_i	Coefficient de sensibilité C_i	Incertitude type $u_i = uv_i / k_i$
Statistique						
Répétabilité	A1	$2,0 \cdot 10^{-4}$		$\sqrt{5}$	1	$8,95 \cdot 10^{-5}$
Reproductibilité	A2	$3,0 \cdot 10^{-4}$		$\sqrt{3}$	1	$1,73 \cdot 10^{-4}$
Appareil						
Etalonnage de l'ampèremètre	BR1	$7,1 \cdot 10^{-4}$	Normale	2	1	$3,55 \cdot 10^{-4}$
Dérive de l'ampèremètre	BR2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	Rectangulaire	$2\sqrt{3}$	1	$3,46 \cdot 10^{-5}$
Résolution de l'ampèremètre	BL1	$\pm 1,0 \cdot 10^{-6}$	Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-7}$
Interpolation de l'ampèremètre	BL2	$\pm 2,9 \cdot 10^{-4}$	Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	$1,67 \cdot 10^{-4}$
Influence de la température sur l'ampèremètre	BL3	0	en U	$2\sqrt{2}$	1	0
Caractéristiques physiques des bobines de Helmholtz	BL4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Normale	2.58	1	$3,88 \cdot 10^{-4}$
Influence de la température sur les bobines de Helmholtz	BL5	0	en U	$2\sqrt{2}$	1	0
Influence de la source de courant	BL6	0	Rectangulaire	$2\sqrt{3}$	1	0
Stabilité de l'appareil en essai	BLX		Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	0
Paramètres environnementaux						
Bruit	BL7	$5,0 \cdot 10^{-4}$	Rectangulaire	$2\sqrt{3}$	1	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Incertitude type composée			$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \cdot u_i^2}$			$6,04 \cdot 10^{-4}$
Incertitude élargie (intervalle de confiance de 95%)			Normale	$u_e = 2u_c$		$1,2 \cdot 10^{-3}$

A1:	nombre de répétitions de mesures N . $k_i = \sqrt{N}$
A2:	la valeur de l'incertitude provient d'une comparaison inter-laboratoires
BR1:	la valeur provient des derniers certificats d'étalonnage de l'ampèremètre
BR2:	variation entre étalonnage de l'ampèremètre
BL1:	variation du dernier chiffre de l'ampèremètre
BL2:	du fait que l'ampèremètre n'est pas utilisé aux points de son étalonnage
BL3:	négligeable
BL4:	incertitude des dimensions physiques des bobines, valeur retenue 10 – 3 à 99%
BL5:	négligeable
BL6:	négligeable dans ce cas mais à définir en fonction du mesureur étalonné et de sa stabilité
BL7:	bruit
BLX:	la variation intrinsèque de l'appareil de mesure est négligée

Annexe C (informative)

Caractéristiques générales des champs magnétiques et électriques

C.1 Généralités

Il est possible de caractériser les champs magnétiques et électriques produits par des lignes de transport d'énergie (ligne d'énergie), des appareils électriques et des systèmes de transport, en fonction de leur amplitude, de leur fréquence, de leur forme d'onde (taux d'harmoniques), de leur degré de polarisation, de leur variation spatiale, et de leur variation temporelle. Ces caractéristiques sont décrites brièvement en raison de leur importance lorsqu'il s'agit de spécifier les exigences relatives aux instruments utilisés pour mesurer les champs.

NOTE La présente norme ne couvre pas les variations temporelles transitoires, c'est-à-dire les événements qui durent peu de temps par rapport à la période des champs magnétiques et électriques.

C.2 Polarisation

Il est possible d'introduire plusieurs des paramètres de champ mentionnés plus haut en considérant le cas des champs magnétiques produits par des lignes d'énergie triphasées. Certains de ces mêmes paramètres sont également utilisés pour caractériser des champs électriques. En général, le champ en un point de l'espace peut être représenté comme un vecteur tournant qui trace une ellipse à chaque cycle des courants dans les conducteurs, comme illustré schématiquement à la Figure C.1a [4]. L'amplitude efficace et la direction du demi-grand axe de l'ellipse du champ, représenté par M dans la Figure C.1a, indiquent l'amplitude et la direction du champ maximal. De la même manière, l'amplitude efficace et la direction du demi-petit axe, représenté par m dans la Figure C.1a, décrivent l'amplitude et la direction du champ minimal. De tels champs sont dits champs à polarisation elliptique.

Dans la mesure où des champs, présents dans des environnements éloignés des lignes d'énergie, peuvent être également produits par de nombreuses sources de courant qui ne sont pas nécessairement en phase, des champs à polarisation elliptique peuvent apparaître en de nombreux endroits (soit le domicile, le lieu de travail, etc.). Selon la géométrie et les courants, ou la tension dans les conducteurs, le degré de polarisation d'un champ en un point, peut varier et aller de linéaire ($m = 0$) à circulaire ($m = M$) comme l'illustrent les Figures C.1b et C.1c. La présente discussion sur les champs polyphasés suppose l'absence totale d'harmoniques dans le champ. L'état de polarisation des champs ayant un taux d'harmoniques significatif est plus complexe [21] , [30].

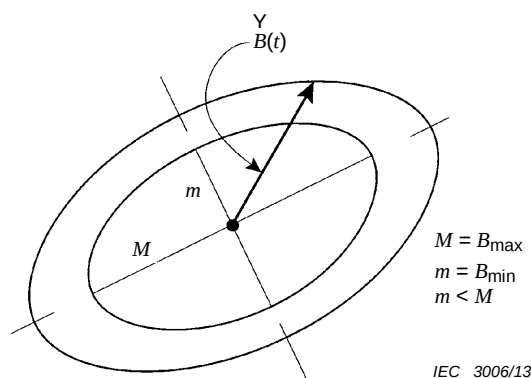


Figure C.1a – Grandeurs pour la polarisation elliptique, $m < M$

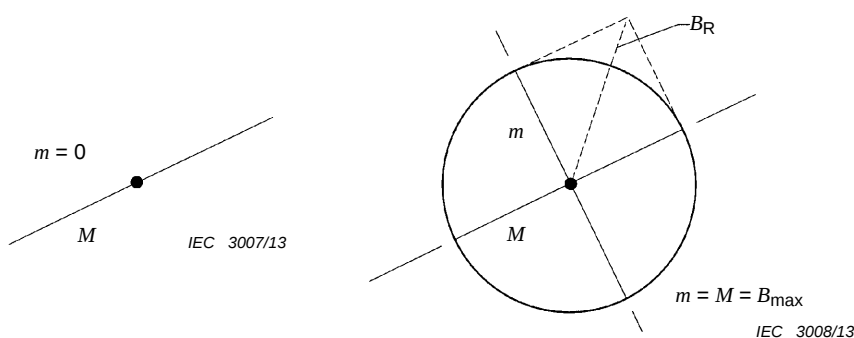


Figure C.1b – Grandeurs pour la polarisation linéaire, $m = 0$

Figure C.1c – Grandeurs pour la polarisation circulaire, $m = M$

Le champ magnétique résultant B_R et le champ magnétique maximal M ne sont égaux que dans le cas d'une polarisation linéaire. La plus grande différence entre le champ magnétique résultant et le champ magnétique maximal est rencontrée dans le cas d'une polarisation circulaire, c'est-à-dire B_R dépasse M de 41 %.

Figure C.1 – Grandeurs de champs oscillants et tournants pour les cas suivants: polarisation elliptique, polarisation linéaire et polarisation circulaire

C.3 Caractéristiques du champ magnétique

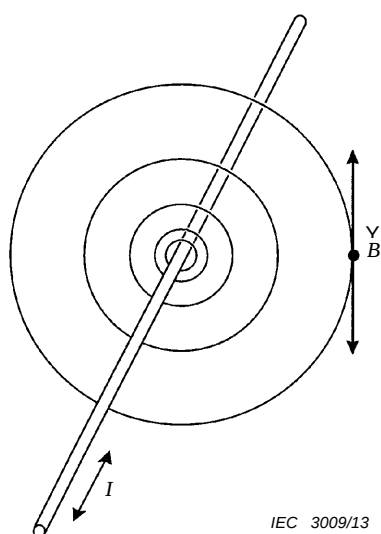
Près du niveau du sol, l'amplitude du champ magnétique produit par une ligne d'énergie triphasée varie lentement en fonction de la hauteur du point de mesure au-dessus du sol. Par exemple, pour une ligne type de 500 kV, la variation de l'amplitude du champ magnétique, à une hauteur voisine de 1 m au-dessus du sol, est inférieure à 2 % pour une variation de 10 % dans la hauteur de mesure pour des emplacements situés juste au-dessus de la ligne. L'uniformité augmente en des points plus distants [11].

Pour des emplacements éloignés de la ligne, l'amplitude du champ magnétique produit par une ligne triphasée constituée d'un seul circuit, avec des courants équilibrés ou presque équilibrés, décroît pratiquement selon $1/r^2$, où r est la distance latérale par rapport à la ligne (r est supposé beaucoup plus grand que la distance séparant les conducteurs) [26]. Au fur et à mesure que le déséquilibre du courant augmente, la décroissance de l'amplitude du champ magnétique évolue d'une variation en $1/r^2$ vers une variation en $1/r$ [26], [33]. Le champ magnétique produit par des lignes triphasées à circuit double, les deux circuits étant équilibrés, avec une mise en phase faiblement inductive (c'est-à-dire pour des courants de charge identiques ou presque identiques sur les deux circuits), décroît approximativement selon $1/r^3$ où r est là encore beaucoup plus grand que la distance séparant les conducteurs. Les variations temporelles du champ magnétique dépendent des variations des courants de charge, par exemple, pendant les périodes où de grandes quantités d'énergie électrique sont utilisées, les

courants de charge augmentent et produisent des champs magnétiques plus grands (l'augmentation simultanée de la flèche des conducteurs peut aussi contribuer à produire des niveaux de champ plus élevés).

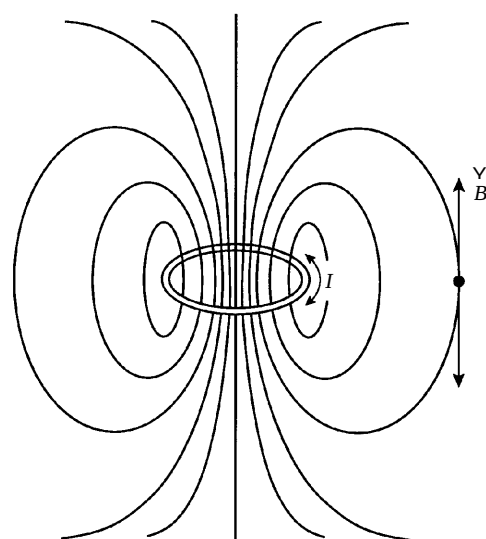
NOTE Bien que le champ magnétique au niveau du sol et près du sol, sous une ligne d'énergie polyphasée, puisse être représenté comme un vecteur tournant ou par un champ à polarisation elliptique, le champ électrique devient linéairement polarisé au niveau du sol.

Parmi les autres sources de champ magnétique couramment rencontrées figurent les conducteurs droits (par exemple les liaisons avec des systèmes/électrodes de mise à la terre) et les tours de fil approximativement circulaires (par exemple ceux rencontrés dans des transformateurs, des moteurs, des écrans de visualisation) avec des courants monophasés. Les Figures C.2a et C.2b illustrent schématiquement les lignes du champ magnétique et les vecteurs en des points représentatifs par rapport à de telles sources. Les champs magnétiques sont habituellement polarisés linéairement et la dépendance vis-à-vis du temps des vecteurs oscillants dépend de la forme d'onde des courants. Des courants sinusoïdaux produisent des champs magnétiques sinusoïdaux exempts d'harmoniques et des courants non sinusoïdaux (par exemple les formes d'ondes en dents de scie générées par les bobines de déflexion des appareils de télévision) produisent des champs magnétiques non sinusoïdaux qui peuvent présenter des taux d'harmoniques élevés [12]. Les amplitudes des champs magnétiques produits par des courants circulant dans un fil droit de longueur infinie et dans une boucle de fil circulaire, diminuent selon $1/r$ [10] et $1/r^3$ [31] respectivement, où r est la distance par rapport à la source de champs (dans le dernier cas, on suppose que r est bien plus grand que le rayon de la boucle de fil circulaire).



IEC 3009/13

Figure C.2a – Courant circulant dans un conducteur droit



IEC 3010/13

Figure C.2b – Courant circulant dans un conducteur circulaire

Figure C.2 – Champ magnétique produit par un courant circulant dans des conducteurs droits et dans des conducteurs circulaires

C.4 Caractéristique du champ électrique

A proximité du niveau du sol, l'amplitude du champ électrique provenant d'une ligne de transport triphasée varie lentement en fonction de la hauteur du point de mesure au-dessus du sol [11].

Contrairement au champ magnétique, le champ électrique est perturbé par la plupart des objets. Ce phénomène est appelé l'effet de proximité. Ceci est dû à la différence de la distribution des charges électriques entre les milieux.

Entre le milieu 1 et le milieu 2, les conditions de passage sont

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (\text{C.1})$$

et

$$\epsilon_2 E_{2n} - \epsilon_1 E_{1n} = \rho_s \quad (\text{C.2})$$

où t = la composante tangentielle, n = la composante normale, ρ_s est la densité de charge de la surface entre les milieux.

Par exemple, un individu situé dans un champ électrique de 50 Hz perturbe la distribution du champ électrique (Figure C.3).

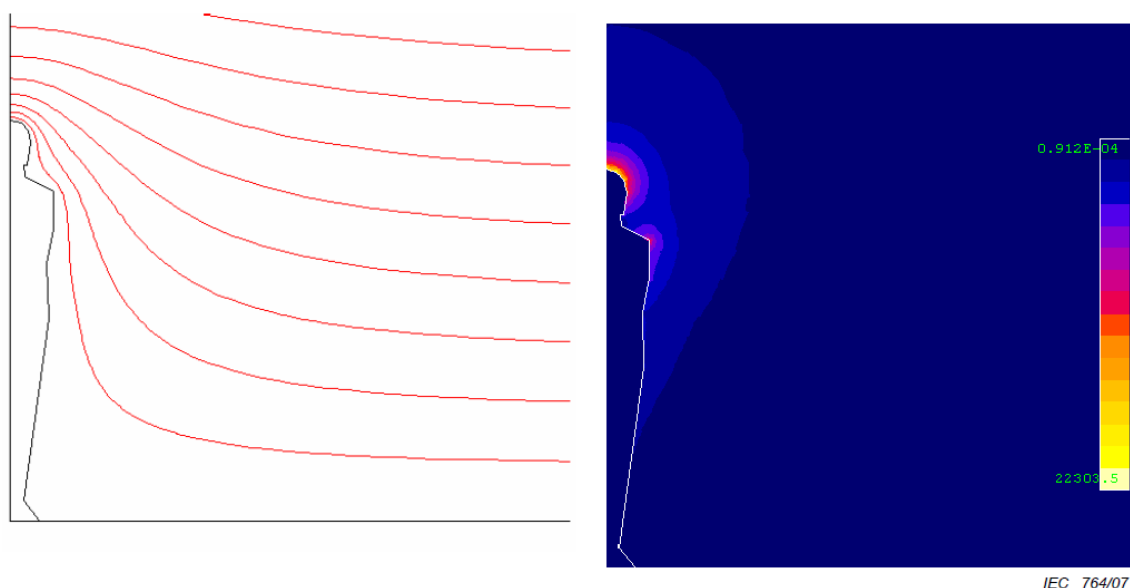
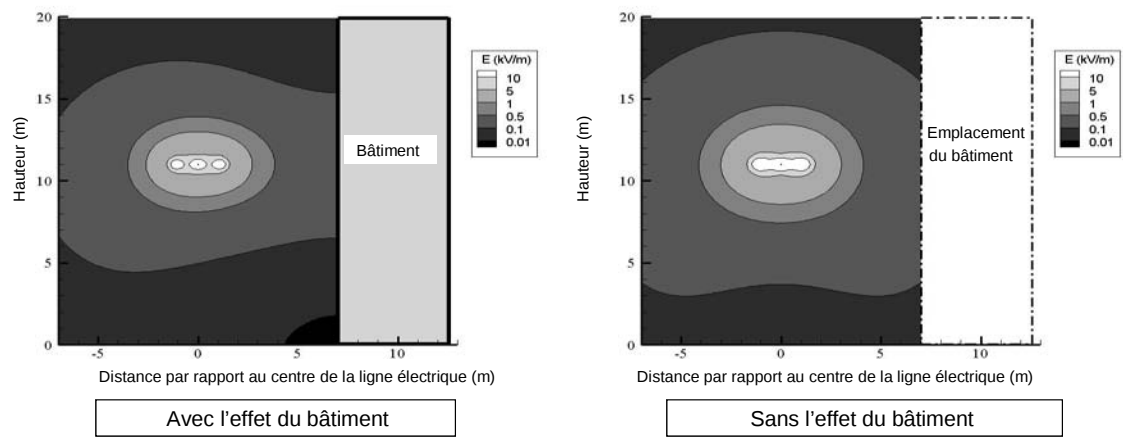


Figure C.3 – Perturbation de la distribution du champ électrique par un individu (extrait de la CEI 62226-3-1)

Le même phénomène peut être observé avec des structures importantes telles que des bâtiments (Figure C.4).



Légende

Hauteur du conducteur	11,0 m
Distance entre les conducteurs	1,12 m
Hauteur du bâtiment	20,0 m, situé à 7,0 m du centre d'une ligne aérienne

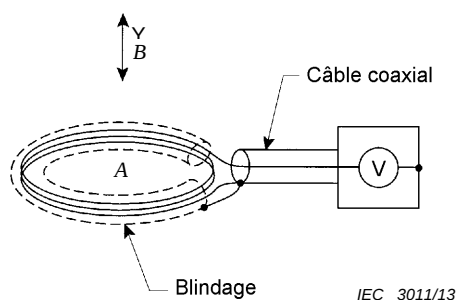
Figure C.4 – Effet de proximité avec une ligne de 25 kV et un bâtiment (extrait de la CEI 62110)

Annexe D (informative)

Mesureurs d'induction magnétique (mesureurs de champ magnétique)

D.1 Caractéristiques générales des mesureurs de champ magnétique

Les mesureurs de champ magnétique se composent de deux parties, la sonde ou partie détectrice de champ, et le détecteur, qui traite le signal provenant de la sonde et indique la valeur efficace du champ magnétique au moyen d'un dispositif d'affichage analogique ou numérique. Les sondes de champ magnétique, constituées d'une bobine de fil blindée électriquement (c'est-à-dire une sonde «mono-axiale»), ont été utilisées en combinaison avec un voltmètre qui joue le rôle du détecteur pour des mesures des champs magnétiques à fréquence industrielle produits par des lignes d'alimentation [13]. La Figure D.1 représente schématiquement ce type d'instrument qui est un mesureur de contrôle. Bien qu'ils ne soient pas représentés à la Figure D.1, les composants du circuit du détecteur sont parfois incorporés à la sonde. Les mesureurs de champ magnétique mesurent la composante du vecteur de champ magnétique oscillant (polarisation linéaire) ou tournant (polarisation elliptique ou circulaire), qui est perpendiculaire à la surface de la ou des sondes. La direction perpendiculaire à la surface de la sonde coïncide avec l'axe sensible de la sonde.



**Figure D.1 – Vue schématique d'un simple mesureur
de champ magnétique muni d'une bobine**

Pour des mesures à effectuer dans des environnements où les composantes harmoniques du champ magnétique peuvent ne pas être négligeables (par exemple environnements industriels et résidentiels, systèmes de transport), un étage d'intégration (actif ou passif) est inclus dans le circuit du détecteur pour conserver la forme d'onde du champ magnétique (voir D.2). Habituellement, aucune disposition n'est prévue pour la mémorisation des données, bien que des connecteurs de sortie pour des appareils enregistreurs disponibles dans le commerce soient parfois prévus. Pour obtenir les amplitudes des composantes fondamentales et harmoniques et ainsi caractériser le taux d'harmoniques du champ magnétique, le signal du détecteur (qui reflète la forme d'onde du champ magnétique) peut être analysé à l'aide d'analyseurs de spectres disponibles dans le commerce. Il existe également des mesureurs de champ magnétique tri-axiaux qui peuvent être commutés ou accordés pour indiquer les valeurs efficaces de la fréquence industrielle et une ou plusieurs composantes harmoniques du champ.

Pendant les mesures de contrôle du champ magnétique, la sonde peut être tenue à la main sans engendrer de perturbation significative du champ due à la proximité de l'observateur. Les effets de proximité de diélectriques proches sont également insignifiants. Les effets de proximité de petits conducteurs non ferreux sont habituellement faibles et localisés près de la surface des conducteurs. En d'autres termes les champs magnétiques, associés aux courants de Foucault dans le conducteur dus à la variation dans le temps du champ magnétique, perturbent localement le champ. Les grandes structures métalliques non ferreuses peuvent

fortement perturber le champ sur une région étendue, par exemple l'intérieur de certaines caravanes. Les champs magnétiques à proximité d'objets ferreux sont fortement perturbés.

Pour des mesures de longue durée et/ou des mesures plus exhaustives, le mesureur de contrôle de champ peut être remplacé par un instrument qui enregistre les mesures de champ dans un système de mémorisation des données [12], [30]. Les enregistrements du champ peuvent être effectués automatiquement à des intervalles de temps prédéfinis, déclenchés par l'utilisateur, ou déclenchés par une autre source, telle qu'un équipement détecteur de position.

Les valeurs de champ enregistrées peuvent par la suite souvent être transférées vers un ordinateur en vue d'une analyse ultérieure. En variante, il est possible de faire effectuer une analyse rudimentaire par l'instrument lui-même.

Les mesureurs de contrôle et les instruments d'enregistrement peuvent être mono-axiaux ou tri-axiaux (bien que les instruments d'enregistrement soient plus généralement tri-axiaux). Les instruments tri-axiaux peuvent être munis de trois bobines ou parties sensibles (par exemple des bobines circulaires à axes orthogonaux) qui détectent le champ suivant trois directions orthogonales entre elles. Les signaux provenant de chacune des parties sensibles des mesureurs tri-axiaux peuvent être traités par le détecteur de deux façons. Selon un principe, le détecteur détermine la valeur efficace de chaque composante spatiale, détermine le carré de chacune de ces valeurs efficaces et en calcule la somme, dont il extrait ensuite la racine carrée. Selon l'autre principe, le détecteur calcule le carré du signal provenant de chaque capteur, extrait la racine carrée de la somme, puis détermine la valeur efficace de la racine carrée. Les deux méthodes aboutissent au même résultat, qui est le champ magnétique résultant B_R , tel que défini par l'Equation (3). En général, le champ magnétique résultant n'est pas égal au champ magnétique maximal, variant de 100 % (pour des champs à polarisation linéaire) à 141 % (pour des champs à polarisation circulaire) par rapport au champ magnétique maximal.

Il convient de noter que B_R est aussi égal à l'induction magnétique totale efficace [16] et ce, indépendamment des phases des composantes orthogonales. L'indépendance des phases fait que B_R n'est pas unique, dans ce sens que le même champ magnétique résultant peut être produit par des champs magnétiques ayant des géométries différentes, par exemple un champ magnétique à polarisation linéaire avec des composantes orthogonales $B_0 \sin \omega t$ et $B_0 \sin \omega t$, et un champ magnétique à polarisation circulaire avec des composantes orthogonales $B_0 \sin \omega t$ et $B_0 \cos \omega t$ auront le même champ résultant B_0 .

Le développement, au cours de ces dernières années, de petits mesureurs d'exposition personnelle pour mesurer les champs magnétiques, qui sont des dispositifs portatifs destinés à mesurer et à enregistrer périodiquement les trois composantes spatiales (efficaces) du champ magnétique, a également conduit à l'utilisation de bobines miniatures, contenant parfois des noyaux ferromagnétiques destinés à augmenter la sensibilité [12]. Bien que les sondes orientées orthogonalement dans les mesureurs d'exposition soient très voisines les unes des autres, il est possible qu'elles n'aient pas un point central commun, c'est-à-dire que les sondes sont placées en des endroits différents. Les mesureurs d'exposition sont équipés d'une interface avec un ordinateur, qui permet le transfert des valeurs de champ enregistrées à des fins d'analyse ultérieure. D'autres types de mesureurs de champ, munis de bobines d'inductance de perméabilité élevée, tels que le magnétomètre à noyau saturable [27], ont été adaptés pour des mesures de champs alternatifs et/ou statiques.

Il existe des instruments encore plus sophistiqués qui enregistrent périodiquement et simultanément la forme d'onde des trois composantes orthogonales du champ magnétique et qui contiennent donc des informations sur l'amplitude, la phase et la fréquence qui sont ultérieurement analysées pour évaluer le degré de polarisation, les harmoniques, etc. [30].

Il existe également des mesureurs de champ magnétique, munis de sondes à effet Hall, qui peuvent servir à mesurer des inductions magnétiques à des fréquences allant de zéro hertz jusqu'à plusieurs centaines de hertz. Cependant, en raison de leur faible sensibilité et des problèmes de saturation liés au champ terrestre, ils ne conviennent pas pour des

environnements où les champs alternatifs sont de faible niveau, par exemple au voisinage des lignes d'alimentation et dans les bâtiments résidentiels.

D.2 Théorie de fonctionnement (bobines)

Le principe de fonctionnement du mesureur de champ magnétique illustré à la Figure D.1 est fondé sur la loi de Faraday qui prévoit qu'une tension V est produite aux extrémités d'une boucle ouverte, placée dans un champ magnétique variable. Spécifiquement, la tension est égale à l'opposé de la vitesse de variation du flux ϕ à travers la boucle, comme donné par la relation

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dA \right] \quad (\text{D.1})$$

où

$\mathbf{B}$ est l'induction magnétique;

$\mathbf{n}$ est un vecteur unitaire perpendiculaire à la surface de la boucle;

dA est un élément de la surface A de la boucle.

V sera exprimée en volts lorsque A et B sont respectivement exprimées en mètres carrés et en tesla.

Si le champ magnétique est exempt d'harmoniques, soit $B = B_0 \sin \omega t$, et perpendiculaire à la surface de la sonde, alors

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t \quad (\text{D.2})$$

où la pulsation ω est égale à 2π fois la fréquence.

Pour une boucle de N spires, la tension donnée par l'Equation (D.2) se développe dans chaque spire et la tension totale est $-N\omega B_0 A \cos \omega t$. L'Equation (D.2) montre que la sensibilité augmente en même temps que la surface de la sonde.

La sonde de bobine peut également servir à mesurer l'induction magnétique statique (c.c.) si la sonde est mise en rotation.

Si le champ magnétique contient des harmoniques, il y aura un terme supplémentaire dans le membre droit de l'Equation (D.2) pour chaque harmonique. A cause de l'opération de différentiation (voir Equation (D.1)), chacun des termes supplémentaires est pondéré par le rang de l'harmonique associée. Par exemple, s'il y avait 10 % d'harmonique 3 dans le champ, le terme $-3 \times 0,1 \times \omega B_0 A \cos 3\omega t$ devrait être ajouté au membre droit de l'Equation (D.2). En raison de la pondération du terme de l'harmonique, la forme d'onde du signal ne reflète plus la forme d'onde du champ. En conséquence, la valeur efficace indiquée par le voltmètre-détecteur (voir Figure D.2) ne fournit pas la représentation fidèle de la valeur efficace du champ. La forme d'onde donne en fait, avec une bonne approximation, la variation temporelle de la tension ou du courant induit(e) dans des matériaux conducteurs.

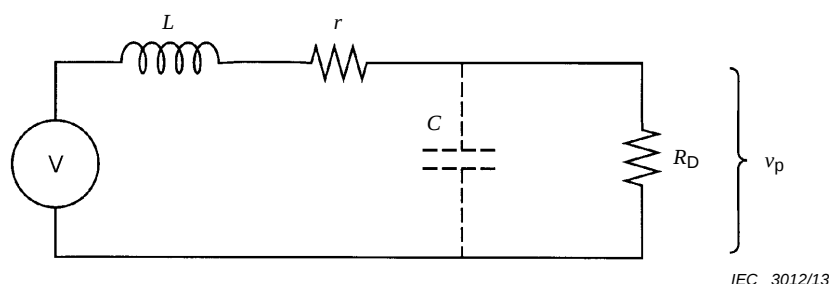
**Légende** L inductance de la bobine r résistance du conducteur C capacité parasite R_D impédance d'entrée du détecteur

Figure D.2 – Circuit équivalent approché d'une bobine, lorsque celle-ci est reliée au détecteur

Pour restituer la forme d'onde du champ magnétique, il est nécessaire que le détecteur effectue l'opération mathématique inverse, à savoir l'intégration. Pour cela, il est possible d'incorporer un étage d'intégration dans le détecteur³. Par exemple, il est possible de combiner l'étage d'intégration avec la sonde sous forme de composants passifs, ou alors il est possible d'intégrer un amplificateur opérationnel dans le détecteur. Il convient que la réponse en fréquence de l'ensemble sonde détecteur intégrateur soit plate sur toute la plage de fréquences étudiée. Il convient que le circuit du détecteur comprenne, dans sa conception, des filtres et un blindage au champ électrique adéquat afin de supprimer les signaux non désirés.

D.3 Instruments de mesure de champs magnétiques statiques

Il est possible d'effectuer des mesures précises de champs magnétiques statiques à l'aide d'une grande variété d'instruments disponibles dans le commerce, utilisant de nombreuses techniques de mesure [20] [14]. Par exemple, les magnétomètres à noyau saturable, les mesureurs de résonance magnétique nucléaire (RMN), les mesureurs à effet Hall, les mesureurs de champ magnéto-résistants et les magnétomètres à dispositifs quantiques supraconducteurs (SQUID) figurent parmi la grande variété d'instruments disponibles.

La plage de mesure de ces mesureurs dépend de la technique de mesure utilisée. Ils ne peuvent pas être utilisés pour des mesures du champ magnétique statique dans tous les environnements. Par exemple, la sensibilité des magnétomètres à noyau saturable convient pour mesurer des champs dans la plage allant de 0,1 μT (et moins) à 0,01 T, ils sont adaptés aux environnements de réseaux à haute tension continue.

Les mesureurs à effet Hall peuvent mesurer facilement des niveaux allant de 100 μT à 10 T [20]. Dans le même ordre de grandeur, la grande précision des mesureurs RMN autorise leur utilisation en tant qu'instrument étalon.

Il existe dans le commerce des aimants étalons pour effectuer des étalonnages à des niveaux de champs relativement élevés, par exemple 0,005 T à 2 T. Le système de bobines mentionné en l'Article A.1 peut servir à produire des champs statiques connus avec des valeurs plus faibles, si des courants continus sont utilisés pour exciter les bobines. Cependant, il convient de tenir compte de l'influence du bruit de fond de champ magnétique statique lorsque son amplitude est significative par rapport à celle du champ étalon. Il existe des aimants étalons munis d'un blindage de protection pour éviter les perturbations générées par des champs magnétiques externes. Le bruit de fond de champ magnétique statique peut également être supprimé en utilisant un ensemble de bobines auxiliaires, en procédant en premier lieu à un étalonnage avec un courant nul, puis en soustrayant la valeur.

³ Si le signal est numérisé, l'intégration peut être effectuée par calcul informatique.

Annexe E **(informative)**

Mesureurs de champ électrique

E.1 Caractéristiques générales des mesureurs de champ électrique

Les mesureurs de champ électrique se composent de deux parties, la sonde ou partie sensible et le détecteur qui traite le signal provenant de la sonde et indique la valeur efficace du champ électrique en volts par mètre sur un dispositif d'affichage analogique ou numérique. Les deux types de mesureurs de champ électrique suivants sont traités dans la présente norme:

- a) le mesureur d'espace libre;
- b) le mesureur avec référence au sol.

Lorsque des mesures du champ électrique sont effectuées, il convient que l'observateur se tienne suffisamment loin de la sonde pour éviter de perturber de façon significative le champ à l'emplacement de la sonde. Il convient que les dimensions des mesureurs d'espace libre soient suffisamment faibles pour que la taille de la sonde ne perturbe pas de façon significative les distributions des charges sur les surfaces voisines qui génèrent le champ électrique, c'est-à-dire des surfaces sous tension et mises à la terre. Bien que les mesureurs de champ soient étalonnés dans des champs électriques pratiquement uniformes, il n'est pas nécessaire que le champ mesuré soit très uniforme. Les mesureurs de champ électrique mesurent la projection du vecteur oscillant (polarisation linéaire) ou tournant (polarisation elliptique ou circulaire) du champ électrique sur l'axe électrique de la sonde (l'axe présentant la plus grande sensibilité au champ électrique). Il existe des mesureurs d'espace libre tri-axiaux pour mesurer le champ électrique résultant.

E.2 Théorie de fonctionnement

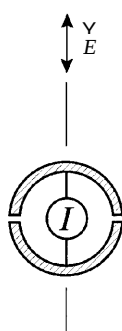
E.2.1 Mesureurs d'espace libre

Les mesureurs d'espaces libres sont habituellement destinés à mesurer le courant induit entre deux parties isolées d'un corps conducteur. Etant donné que le courant induit est proportionnel à la dérivée par rapport au temps du champ électrique, le circuit du détecteur du mesureur contient souvent un étage d'intégration permettant de restituer la forme d'onde du champ électrique. La forme d'onde intégrée du courant coïncide également avec celle de la charge induite. L'étage d'intégration est aussi souhaitable, notamment pour la mesure de champs électriques avec un taux d'harmoniques, parce que cet étage (c'est-à-dire sa propriété d'intégration) élimine la pondération excessive des composantes harmoniques dans le signal du courant induit.

Les mesureurs d'espace libre déterminent le champ électrique en mesurant le courant induit ou la charge induite oscillant entre les moitiés conductrices (électrodes) d'une sonde isolée électriquement, après l'introduction de la sonde dans le champ électrique. Pour des mesureurs d'espace libre disponibles dans le commerce, le détecteur est habituellement contenu dans la sonde ou fait partie intégrante de celle-ci. La sonde et le détecteur sont maintenus dans le champ électrique à l'extrémité d'une perche isolante [5] , [13]. Le mesureur d'espace libre convient pour des mesures de contrôle parce qu'il est portatif, qu'il permet d'effectuer des mesures au-dessus du niveau du sol, et qu'il ne nécessite pas un potentiel de référence de terre. Il existe dans le commerce des mesureurs d'espace libre mono-axiaux et tri-axiaux. Les mesureurs d'espace libre sont normalement alimentés par des batteries.

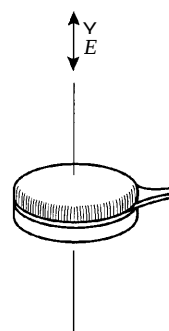
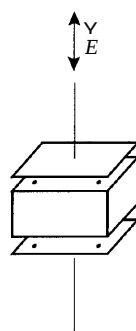
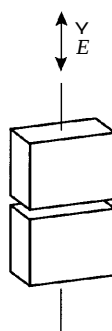
Il existe également des mesureurs d'espace libre conçus pour un affichage à distance du champ électrique. Dans ce cas, une partie du circuit de traitement du signal est contenue dans la sonde et la partie restante du détecteur est placée dans une enceinte séparée munie d'un

dispositif d'affichage analogique ou numérique. Une liaison par fibre optique relie la sonde au dispositif d'affichage [9] , [17].



IEC 3013/13

Figure E.1a – Mesureur de champ électrique d'espace libre sphérique



IEC 3014/13

Figure E.1b – Mesureurs de champ électrique mono-axiaux, disponibles dans le commerce

Figure E.1 – Formes géométriques des mesureurs de champ électrique mono-axiaux

La Figure E.1 illustre des exemples de configurations géométriques de mesureurs d'espace libre mono-axiaux. La théorie de fonctionnement des mesureurs d'espace libre peut être comprise en considérant un corps conducteur non chargé, introduit dans un champ électrique uniforme E , et dont les deux moitiés sont séparées électriquement et constituent les électrodes. La charge induite dans une des électrodes est

$$Q = \int_{S/2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA \quad (\text{E.1})$$

où

$\mathbf{D}$ est le déplacement électrique;

$\mathbf{n}$ est un vecteur unitaire perpendiculaire à la surface de l'électrode;

dA est un élément de surface sur la moitié du corps ayant une surface totale S .

Le cas de la géométrie sphérique comme illustrée sur la Figure E.1a donne le résultat suivant:

$$Q = 3\pi a^2 \varepsilon_0 E \quad (\text{E.2})$$

où

ε_0 est la permittivité de vide;

a est le rayon de la sphère [29].

NOTE La densité de charge superficielle est donnée par la formule $3\varepsilon_0 E \cos\theta$. L'intégration sur l'hémisphère donne l'Equation (E.2) (voir [29]).

En ce qui concerne les géométries moins symétriques, le résultat peut être exprimé sous la forme

$$Q = k \varepsilon_0 E \quad (\text{E.3})$$

où k est une constante dépendant de la géométrie de la sonde.

On a utilisé des cubes et des plaques parallèles comme électrodes détectrices (voir Figure E.1b). Si le champ électrique varie sinusoïdalement en fonction du temps, par exemple $E_0 \sin \omega t$ où ω est la pulsation, la charge induite oscille entre les deux moitiés et le courant est donné par

$$I = \frac{dQ}{dt} = k\omega\epsilon_0 E_0 \cos \omega t \quad (\text{E.4})$$

La constante k , qui peut être considérée comme la constante du mesureur de champ, est déterminée par étalonnage. L'influence de la poignée, représentant une impédance de fuite, et la perturbation introduite par l'observateur sont considérées comme négligeables dans le texte ci-dessus.

S'il y a des harmoniques dans le champ électrique, il y aura un terme supplémentaire dans le membre de droite de l'Equation (E.4) pour chaque harmonique. En raison de l'opération de différentiation dans l'Equation (E.4), chacun des termes supplémentaires sera pondéré par le rang de l'harmonique associée. Comme dans le cas du mesureur de champ magnétique (voir D.2), il est nécessaire que le détecteur effectue l'opération mathématique inverse, à savoir l'intégration, pour restituer la forme d'onde du champ électrique. Pour cela, on introduit un étage d'intégration. Par exemple, un amplificateur d'intégration ou un circuit intégrateur passif combiné à un voltmètre pourrait servir de détecteur. Il convient de rendre plate, sur toute la plage de fréquences étudiée, la réponse en fréquence de l'ensemble constitué de la sonde et du circuit intégrateur. Il convient d'utiliser des filtres pour exclure des signaux extérieurs à la plage de fréquences étudiée.

E.2.2 Mesureurs avec référence au sol

Les mesureurs avec référence au sol déterminent le champ électrique en mesurant le courant ou la charge sur la surface sensible d'une sonde plane. De tels mesureurs sont normalement utilisés pour mesurer le champ électrique au niveau du sol ou sur des surfaces conductrices planes qui sont au potentiel de la terre. Deux modèles de sondes ont été utilisés. Un modèle utilise un conducteur plat unique ayant une section centrale isolée qui lui sert de surface sensible. Des versions miniatures de ce type de sonde ont été réalisées avec une carte à circuit imprimé double face, comme illustré à la Figure E.2a. Il existe un second modèle composé de deux plaques parallèles séparées par une mince feuille d'isolant, la plaque supérieure agissant comme la surface sensible comme illustré à la Figure E.2b.

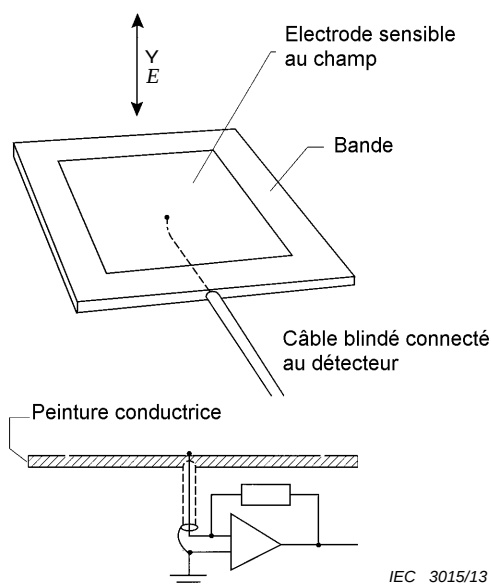


Figure E.2a – Sonde plate réalisée à l'aide d'un circuit imprimé double face

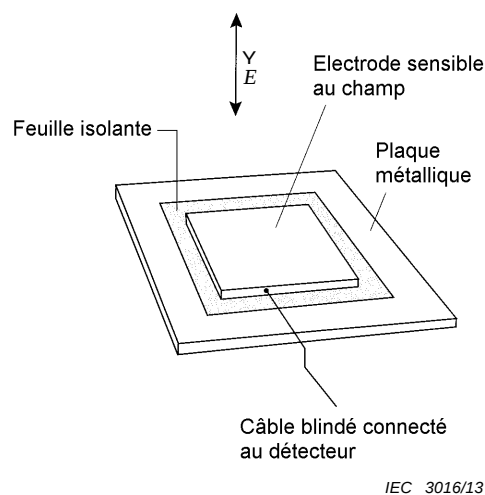


Figure E.2b – Sonde plate constituée de deux plaques parallèles séparées par une feuille isolante

Figure E.2 – Modèles de sondes planes utilisées avec des mesureurs avec référence au sol

A partir de la loi de Gauss, la charge Q , induite sur une surface sensible ayant une aire A , est exprimée sous la forme

$$Q = \varepsilon_0 EA \quad (\text{E.5})$$

où

E est le champ électrique moyen à travers la surface sensible;

ε_0 est la permittivité du vide.

Si l'on suppose que E varie de manière sinusoïdale en fonction de la pulsation ω , (c'est-à-dire $E = E_0 \sin \omega t$), le courant induit résultant est donné par

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega \varepsilon_0 E_0 A \cos \omega t \quad (\text{E.6})$$

S'il y a des harmoniques dans le champ électrique, il y aura à nouveau un terme supplémentaire dans le second membre de l'Equation (E.6) pour chaque harmonique. Comme en E.2.1, en raison de l'opération de différenciation, chacun des termes supplémentaires est pondéré par le rang de l'harmonique associée. Pour restituer la forme d'onde du champ électrique, il est nécessaire que l'opération mathématique inverse soit effectuée, à savoir, l'intégration. Il est possible d'utiliser comme détecteur, un ensemble constitué d'un circuit intégrateur et d'un voltmètre et produisant une réponse en fréquence uniforme sur toute la plage de fréquences étudiée. Il convient d'utiliser des filtres faisant également partie intégrante du circuit du détecteur pour exclure des signaux extérieurs à la plage de fréquences étudiée. Les mesureurs avec référence au sol peuvent être alimentés par batteries ou par secteur.

NOTE Les mesureurs avec référence au sol destinés à mesurer le courant induit contiennent souvent un circuit intégrateur destiné à compenser la relation de dérivation entre le courant induit et le champ électrique.

Les mesureurs de champ électrique munis de sondes planes peuvent être utilisés pour mesurer le champ électrique sur des surfaces planes sous tension, si le détecteur fonctionne au même potentiel que la surface sous tension. Dans de tels cas, il convient d'observer à distance le dispositif d'affichage analogique ou numérique du détecteur, par exemple visuellement à une certaine distance ou à l'aide d'une liaison par fibre optique.

Annexe F (informative)

Influence de l'humidité sur la mesure du champ électrique

F.1 Conditions de mesure

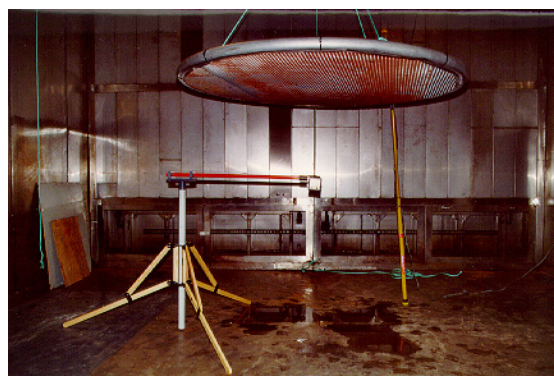
Afin de pouvoir évaluer l'influence de l'humidité sur la mesure du champ électrique, des essais ont été effectués dans une enceinte climatique sur le site R&D de EDF "Les Renardières" [2]. Le champ électrique a été généré par une plaque de 2 m de diamètre, placée à une hauteur d'environ 2 m, et en appliquant une tension de manière à obtenir un champ électrique vertical d'environ 10 kV/m. Le contrôle climatique a été réglé de façon à maintenir une température proche de 20 °C. Pendant les essais, la température variait réellement entre 18 °C et 21 °C. Les essais ont été réalisés avec un taux d'humidité variant de 20% à 100%.

Trois mesureurs d'espace libre ont été soumis à essai, l'un était un mesureur mono-axial (mesureur 1) et les deux autres étaient des mesureurs tri-axiaux (mesureur 2 et mesureur 3)

L'influence du support des mesureurs a également fait l'objet d'essai et les mesureurs ont été installés sur deux trépieds: un trépied "normal" (trépied isolé) et l'autre muni d'une tige isolante permettant de déporter horizontalement le mesureur (désigné "trépied déporté"). Voir la Figure F.1.



IEC 3017/13



IEC 3018/13

Figure F.1 – Essai dans l'enceinte climatique avec le trépied normal (à gauche) et le trépied décalé (à droite) (photographie R&D de EDF)

L'influence de la couche de revêtement en graisse au silicium apposée sur le support du mesureur (composés hydrophobes) a également fait l'objet d'essais.

F.2 Résultats

Les Figures F.2 et F.3 donnent les principaux résultats des essais.

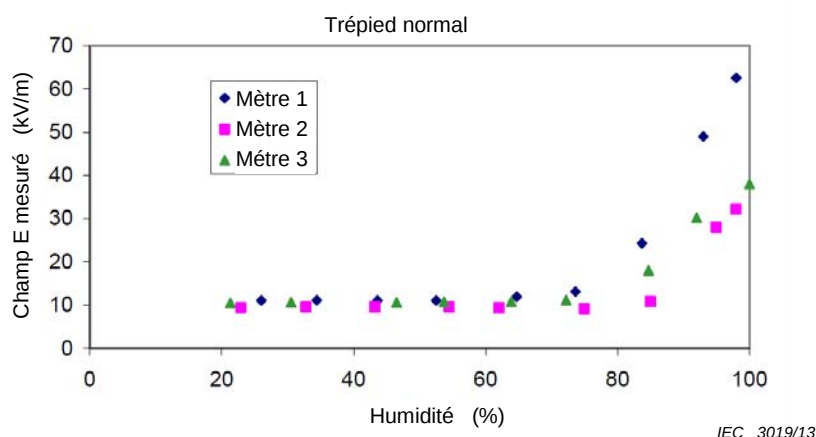


Figure F.2 – Champ E mesuré en fonction de l'humidité avec un trépied normal

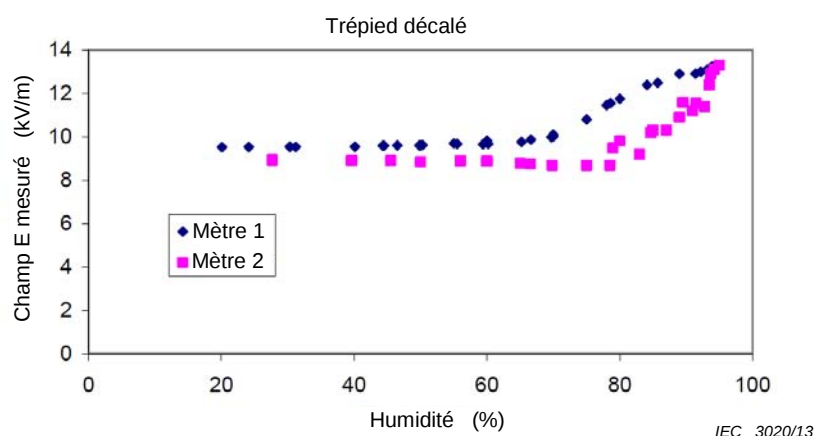


Figure F.3 – Champ E mesuré en fonction de l'humidité avec un trépied déporté

Les résultats montrent l'influence de l'humidité sur la mesure du champ électrique. La valeur mesurée augmente en fonction de l'humidité.

La dérive du champ mesuré par rapport au champ réel est particulièrement élevée avec un trépied normal lorsque l'humidité relative est supérieure à 70% (jusqu'à une erreur d'un facteur 7 sur la lecture du champ appliqué). De ce fait, il est recommandé d'utiliser le trépied déporté dans la mesure où l'amplitude de la dérive est bien inférieure (l'erreur maximale n'est que de 40 % du champ appliqué).

L'utilisation de composés hydrophobes (graisse au silicium) comme revêtement du support n'a démontré aucune réduction des effets de l'humidité.

Annexe G (informative)

Unités

G.1 Unités

Les unités recommandées sont celles du Système international d'unités (SI Units) ainsi que les unités dérivées des unités du Système International. La liste ci-dessous fournit quelques unités du système international ainsi que quelques unités dérivées des unités du système international, qui sont couramment utilisées.

Pour d'autres unités, voir [15].

G.2 Unités du Système international et unités dérivées des unités du Système international

Temps:	seconde (s)
Potentiel électrique:	volt (V)
	kilovolt (kV)
Courant:	ampère (A)
Inductance:	henry (H)
Résistance:	ohm (Ω)
Champ électrique:	volts par mètre (V/m)
Induction magnétique:	tesla (T)
Champ magnétique:	ampères par mètre (A/m)

G.3 Constantes physiques utiles

Constante de perméabilité en espace libre μ_0 :	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Constante de permittivité en espace libre ϵ_0 :	$8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
Conversion entre tesla et gauss:	1 mG = 0,1 μ T
Conversion entre tesla et ampères par mètre (où $\mu = \mu_0$): B (en μ T) = $0,4 \times \pi \times$ H (en A/m)	

Bibliographie

- [1] BOTTAUSCIO, O., et al. Generation of reference electric and magnetic fields for calibration of power-frequency field meters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, vol. 42, no. 2, p. 547-552.
- [2] CIGRE WORKING GROUP C4.203 *Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines*. Technical Brochure n°375, 2009.
- [3] DELAPLACE, L.R. AND REILLY, J.P. Electric and Magnetic Field Coupling from High Voltage AC Power Transmission Lines -- Classification of Short-Term Effects on People. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, vol. PAS-97, no. 6, p. 2243-2252.
- [4] DENO, D.W. Transmission line fields. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1976, vol. PAS-95, no. 5, p. 1600-1611.
- [5] DENO, D.W. Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field - measurement and calculation of distribution and dose. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977, vol. 96, no. 5, p. 1517-1527.
- [6] FIRESTER, A.H. Design of Square Helmholtz Coil Systems. *Review of Scientific Instruments*, 1966, vol. 37, no. 9, p. 1264-1265.
- [7] FRIX, W.M., et al. Comparison of calibration systems for magnetic field measurement equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol. 9, no. N°1.
- [8] *NBS ambient magnetic field meter for measurement and analysis of low-level power frequency magnetic fields in air*. 1985, no. NBSIR 86-3330.
- [9] GOCKENBACH, E., et al. 1989. *Some Applications of an Electric Field Sensor in the High-Voltage Technique*. In Proceedings of the Sixth International Symposium on High-Voltage Engineering, New Orleans, LA, 1989.
- [10] HALLIDAY, D. AND RESCNICK, R. *Physics, Parts I and II*. New York: Wiley & Sons, 1966. p. 861-862.
- [11] IEC 62110:2009, *Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure*
- [12] IEEE MAGNETIC FIELDS TASK FORCE. Measurements of power frequency magnetic fields away from power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, vol. 6, no. 2, p. 901-911.
- [13] IEEE STD 644-1994, *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*
- [14] IEEE STD C95.3.1:2010, *IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 100 kHz*
- [15] ISO 80000-1:2009, *Quantities and units – Part 1: general*
- [16] KAUNE, W.T., et al. Residential magnetic and electric fields. *Bioelectromagnetics*, 1987, vol. 8, p. 315-335.

- [17] KIRKHAM, H., et al. *AC and DC Electric Field Meters Developed for the U.S. Department of Energy*. 1987, no. JPL Publication 87-20.
- [18] KIRSCHVINK, J.L. Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems: improved techniques for the design of bioelectromagnetic experiments. *Bioelectromagnetics*, 1992, vol. 13, no. 5, p. 401-411.
- [19] KOTTER, F.R. AND MISAKIAN, M. *AC transmission line field measurements*. 1977, no. NBS 1549 report prepared for the Department of Energy, available as report 1550 PB82133554 from NTIS, Springfield, VA 22161.
- [20] LENZ, J.E. A review of magnetic sensors. *Proceedings of the IEEE*, 1990, vol. 78, no. 6, p. 973-989.
- [21] MAMISHEV, A.V. AND RUSSELL, B.D. Measurements of magnetic fields in the direct proximity of power line conductors. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1995, vol. 10, no. 3, p. 1211-1216.
- [22] MISAKIAN, M. Calibration of flat 60-Hz electric field probes. *Bioelectromagnetics*, 1984, vol. 5, no. 4, p. 447-450.
- [23] MISAKIAN, M. *Discussion of {Takuma, 1985 #4269}* 1985.
- [24] MISAKIAN, M., et al. *Biological, physical, and electrical parameters for in vitro studies with ELF magnetic and electric fields: a primer*. *Bioelectromagnetics*, 1993, vol. Suppl 2, p. 1-73.
- [25] NISSEN, J. AND PAULSSON, L.E. Influence of field inhomogeneity in magnetic calibration coils. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, vol. 45, no. 1, p. 304-306.
- [26] OLSEN, R.G., et al. Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1988, vol. 3, no. 4, p. 2127-2136.
- [27] PRIMDAHL, F. The fluxgate magnetometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1979, vol. 12, no. 4, p. 241.
- [28] RAMO, S. AND WHINNERY, J.R. *Fields and Waves in Modern Radio*. New York: John Wiley, 1944. p. 141.
- [29] REITZ, J.R. AND MILFORD, F.J. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1960. p. 52.
- [30] SICREE, R.M., et al. Comparison of magnetic flux density meter responses over a database of residential measurements. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1993, vol. 8, no. 2, p. 607-619.
- [31] STRATTON, J.A. *Electromagnetic Theory*. New york: McGraw-Hill, 1941. p. 437.
- [32] TAKUMA, T., et al. Analysis Of Calibration Arrangements For AC Field Strength Meters. Power Apparatus and Systems, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1985, vol. PAS-104, no. 2, p. 488-496.
- [33] VINH, T., et al. Magnetic fields near overhead distribution lines - measurements and estimating technique. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 1991, vol. 6, no. 2, p. 912-919.

- [34] WEBER, E. *Electromagnetic Theory*. New York: Dover, 1965. p. 131-133.
 - [35] CEI 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International* (disponible à <<http://www.electropedia.org>>)
 - [36] ISO/CEI 17025:2005, Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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