

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings –
Part 2: Basic standard for measurements**

**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 2: Norme de base pour les mesures**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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



IEC 61786-2

Edition 1.0 2014-12

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings –
Part 2: Basic standard for measurements**

**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 2: Norme de base pour les mesures**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

W

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-8322-1970-6

**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	7
3 Terms and definitions	7
4 General considerations.....	8
4.1 Different goals of measurement	8
4.1.1 General.....	8
4.1.2 Characterisation of field levels for compliance with safety standards.....	9
4.1.3 Characterisation of spatial variations.....	9
4.1.4 Characterisation of temporal variation.....	11
4.1.5 Characterisation of frequency content in magnetic field or electric field.....	12
4.1.6 Characterisation of population exposure to magnetic field and definition of metric.....	13
4.2 Sources with multiple frequencies	14
4.2.1 General.....	14
4.2.2 Sum of weighted magnitudes	14
4.2.3 Weighted peak value.....	15
4.2.4 Impulse separation.....	15
4.2.5 Weighted RMS value.....	15
4.2.6 Highest weighted spectral line.....	16
4.2.7 Conclusion and recommendation.....	16
4.3 Considerations before measurements	16
5 Measurement procedures and precaution	17
5.1 AC magnetic field.....	17
5.2 DC magnetic field	18
5.3 AC electric field	19
6 Measurement uncertainty	21
7 Measurement report	22
Annex A (informative) Examples of fields characteristics in typical environments	24
Annex B (informative) Examples of measurement distances	27
B.1 IEC 62110:2009 [9].....	27
B.2 IEC 62233: 2005 [10]	27
B.3 IEC 62311:2007 [11]	27
B.4 IEC 62369-1:2008 [12]	27
B.5 IEC/TS 62597:2011 [14].....	27
B.6 IEC 62493:2009 [13].....	28
Annex C (normative) Measurement uncertainty.....	29
C.1 Overview.....	29
C.2 Assessment of type A uncertainty	29
C.3 Assessment of type B uncertainty	29
C.3.1 Non-uniform field.....	29
C.3.2 Pass-band limitations	30
C.3.3 Temperature	30
C.3.4 Humidity	30
C.3.5 Location of measurement.....	30

C.3.6	Long-term drift.....	31
C.3.7	Instrument time constant	31
C.3.8	Proximity effect of observer (for electric field)	31
C.3.9	Correction factor.....	31
C.3.10	Hysteresis between scales	31
Annex D (informative)	Example of measurement uncertainty.....	32
Bibliography	33
Figure 1	– Magnetic field levels under a 77 kV overhead transmission line (from [9])	10
Figure 2	– Electric field levels under an overhead transmission line (from [9]).....	10
Figure 3	– Example of load variation of 735kV line due to the human activities (daily) and outdoor temperature (seasonal)	11
Figure 4	– 50 Hz magnetic field in a high speed train in France	12
Figure 5	– Waveform (a) and frequency spectrum (b) of magnetic field generated by a 66,04 cm (26 inches) flat-screen LCD television	13
Figure 6	– Example of DC magnetic field profile above DC underground cable (calculated at a height of 1 m).....	19
Figure 7	– Observer proximity effects during electric field measurements in vertical electric field	20
Figure A.1	– Magnetic field exposure of typical worker (electrician) in North American power plant (based on 3 days recording)	25
Figure B.1	– Lighting equipment and measurement distances (from [13]).....	28
Table A.1	– Example of field characteristics inside (workers environment) and outside (public environment) electric substations in a North American utility	24
Table A.2	– Field characteristics (μT) in different mass transportation system in US: average and (maximum)	26
Table D.1	– Example of measurement uncertainty	32

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 2: Basic standard for measurements

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 61786-2 has been prepared by IEC technical committee 106: Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure.

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

FDIS	Report on voting
106/322/FDIS	106/326/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.

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 2: Basic standard for measurements

1 Scope

This part of IEC 61786 provides requirements for the measurement of quasi-static magnetic and electric fields that have a frequency content in the range 1 Hz to 100 kHz, and DC magnetic fields, to evaluate the exposure levels of the human body to these fields.

Specifically, this standard gives requirements for establishing measurement procedures that achieve defined goals pertaining to human exposure.

NOTE Requirements on field meters and calibration are described in IEC 61786-1

Because of differences in the characteristics of the fields from sources in the various environments, e.g. frequency content, temporal and spatial variations, polarization, and magnitude, and differences in the goals of the measurements, the specific measurement procedures will be different in the various environments.

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 independent of the power frequency, and DC power transmission, and the geomagnetic field. The magnitude ranges covered by this standard are 0,1 μ T to 200 mT for AC (1 μ T to 10 T for DC) for magnetic fields, and 1 V/m to 50 kV/m for electric fields.

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

Examples of sources of fields that can be measured with this standard include:

- devices that operate at power frequencies (50/60 Hz) and produce power frequency and power-frequency harmonic fields (examples: power lines, electric appliances...)
- devices that produce fields that are independent of the power frequency. (Examples: electric railway (DC to 20 kHz), commercial aeroplanes (400 Hz), induction heaters (up to 100 kHz), and electric vehicles.)
- devices that produces static magnetic fields: MRI, DC power lines, DC welding, electrolysis, magnets, electric furnaces, etc. DC currents are often generated by converters, which also create AC components (power frequency harmonics), which should be assessed.

When EMF products standards are available, these products standards should be used.

With regard to electric field measurements, this standard considers only the measurement of the unperturbed electric field strength at a point in space (i.e. the electric field prior to the introduction of the field meter and operator) or on conducting surfaces.

Sources of uncertainty during measurements are also identified and guidance is provided on how they should be combined to determine total measurement uncertainty.

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 61786-1:2013, *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*

ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

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

3 Terms and definitions

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

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

3.1

average exposure level

spatial average over the entire human body of fields to which the individual is exposed

3.2

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.

3.3

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

repeatability (of results of measurements)

closeness of agreement between the results of successive measurements of the same measurand, carried out under the same conditions of measurement, i.e.:

- by the same measurement procedure,
- by the same observer,
- with the same measuring instruments, used under the same conditions,
- in the same laboratory,
- at relatively short intervals of time.

[SOURCE: IEC 60050-311:2001, 311-06-06, modified –The note to entry has been deleted.]

3.5 reproducibility (of measurements)

closeness of agreement between the results of measurements of the same value of a quantity, when the individual measurements are made under different conditions of measurement:

- principle of measurement,
- method of measurement,
- observer,
- measuring instruments,
- reference standards,
- laboratory,
- under conditions of use of the instruments, different from those customarily used,
- after intervals of time relatively long compared with the duration of a single measurement

[SOURCE: IEC 60050-311:2001, 311-06-07, modified –The notes to entry have been deleted.]

3.6 standard uncertainty

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

3.7 uncertainty of measurement

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

Note 1 to entry: Uncertainty of measurement 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 characterised by experimental standard deviations. Estimates of other components can be based on experience or other information.

4 General considerations

4.1 Different goals of measurement

4.1.1 General

Magnetic and electric fields can be characterised according to a number of parameters, i.e. magnitude, frequency, polarization, etc. (see IEC 61786-1:2013, Annex C). Characterisation of one or more of these parameters and how they might relate to human exposure may serve as possible goals of a measurement programme. As an aid for readers interested in developing a field measurement protocol, this subclause provides a list of such possible measurement goals and possible methods for their accomplishment.

Except in the vicinity of high voltage sources, there is no need to measure the power frequency electric field, because the electric field will be, at most, a few tens of volts per metre [3; 22]¹.

Annex A gives examples of typical field characteristics in different environments.

The goals of a measurement programme, such as those considered below, shall be clearly defined. A clear definition of goals is required for the determination of instrumentation and calibration requirements, e.g. instrumentation pass-band, magnitude range, frequency calibration points, etc. Once the goals have been identified and appropriate instrumentation has been acquired, a pilot study in the measurement environment of interest may be desirable

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

before decisions are made as to the final measurement methods and associated protocol. The protocol will describe the step-by-step procedure to follow, using the possible methods indicated, to accomplish the measurement goals. The protocol may explicitly indicate such things as instrument requirements (e.g. pass-band, probe size, magnitude range), location of measurements and duration of measurements. It should then be possible, using the same protocol, to compare with confidence measurement results obtained in similar electrical environments.

Possible measurement goals and possible methods for their accomplishment are given in 4.1.2 to 4.1.6.

4.1.2 Characterisation of field levels for compliance with safety standards

Limits on permissible electric or magnetic field levels expressed as resultant values and as a function of frequency have been indicated in a number of documents, such as [17-19; 21] necessitating the determination of field levels with the maximum value or spatial value in specified areas. The choice of measurement location shall be done in consideration of the possible location of people.

Method: Three-axis meters shall be used to make such measurements of the resultant magnetic and electric fields. Standards and guidance exist for such measurements near power lines [4; 9; 15] and electric appliances [10].

Measurements of magnetic fields near power lines should be correlated with load currents. Load currents for appliances are either constant or, typically, periodic through a fixed range in a relatively short time, enabling the determination of the largest resultant magnetic field with relatively few measurements.

4.1.3 Characterisation of spatial variations

Magnetic and electric fields are not constant around sources. For example, variations of magnetic or electric fields below power lines are typical (Figures 1 and 2) and can be calculated.

In Figure 1, non-uniformity is defined by [4; 9] as the maximum value of

$$\left(|B_h - B_{avg}| \right) / B_{avg} \times 100 (\%)$$

Where

B_h is the magnetic field level at heights of 0,5 m, 1,0 m and 1,5 m above ground;

B_{avg} is the arithmetic mean of the three levels.

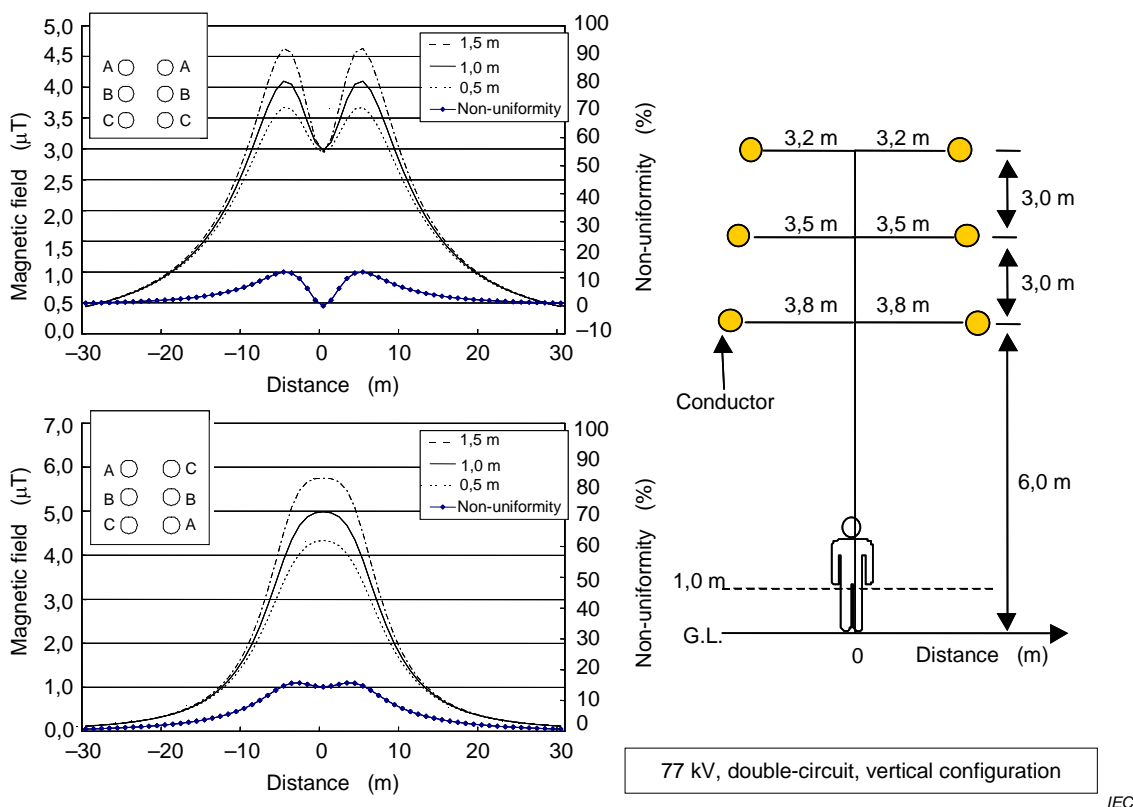


Figure 1 – Magnetic field levels under a 77 kV overhead transmission line (from [9])

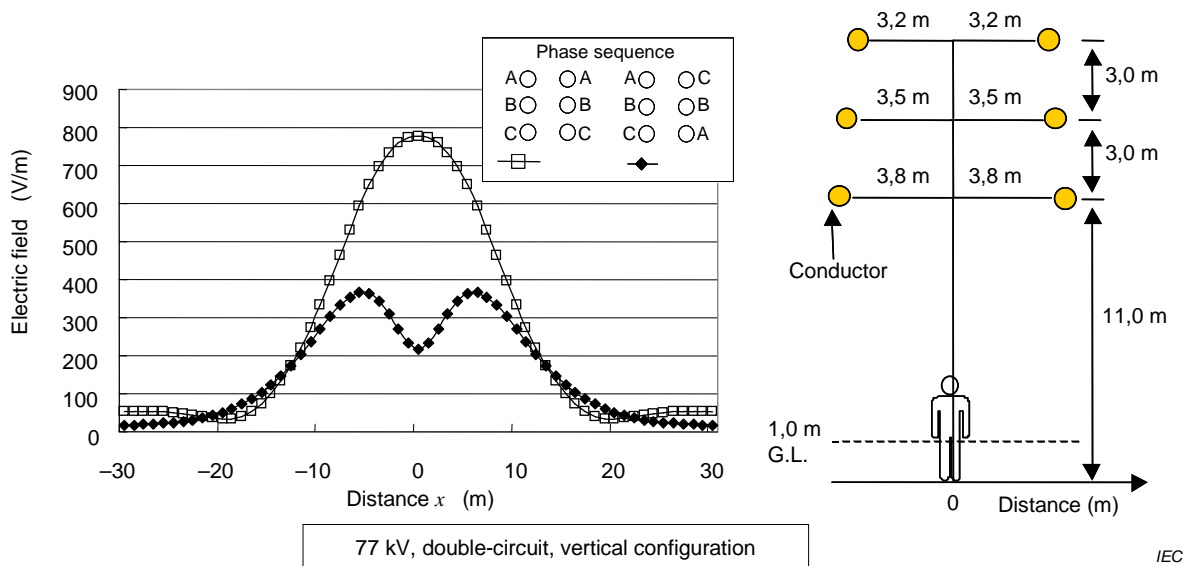


Figure 2 – Electric field levels under an overhead transmission line (from [9])

The spatial distribution of magnetic fields away from power lines or single identifiable sources is typically unknown.

Alternating magnetic fields in most environments will be non-uniform because of the spatial dependence of the fields from the source currents. It is noteworthy that static magnetic fields also show considerable spatial variability in residences [29].

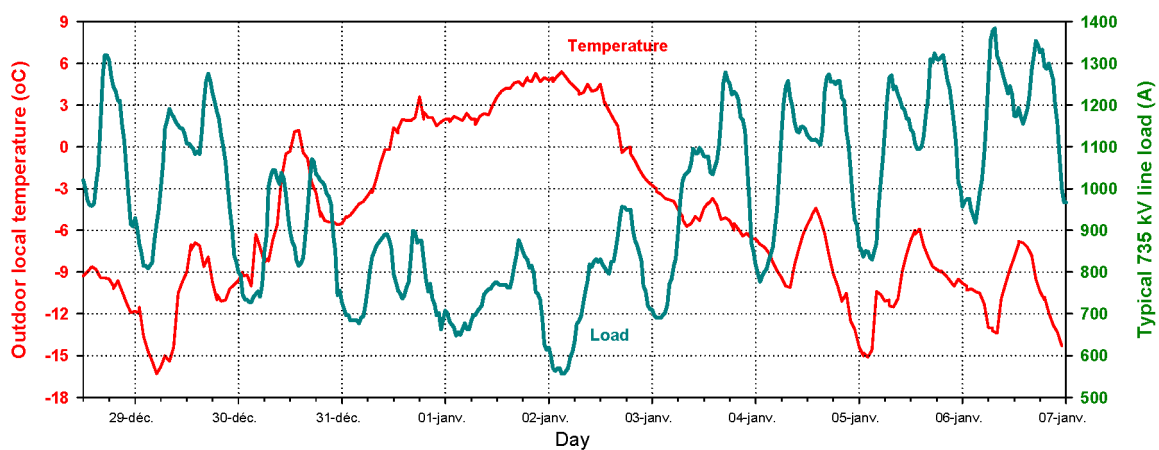
Method: The magnetic field components shall be recorded as a function of coordinate position when characterising spatial variation. Standards exist for carrying out such measurements

near power lines [4; 9; 15] and electric appliances [[9]]. While such measurements can be made with survey meters, instrumentation incorporating "measurement wheels" is available for characterising spatial distributions of magnetic fields in environments where physical obstructions do not hinder the movement of the wheel. As the wheel rotates, it periodically triggers a three-axis magnetic field meter to record the resultant magnetic field. Software provided with such instrumentation permits the generation of plots of magnetic field profiles, equifield contours, statistical analyses of the field levels, etc [2; 26]. As for characterisation of field levels for compliance with safety limits, such data will not take the temporal variations of the field profiles into account without repeated measurements.

4.1.4 Characterisation of temporal variation

Because magnetic fields are produced by load currents and ground return currents that can vary greatly with time, the temporal variations of magnetic fields can easily exceed a factor of 2.

Under a power line, the magnetic field depends on the load of the line. For single circuit lines or double circuit lines operated in parallel, the magnetic field is directly proportional to the load of the line. Figure 3 gives an example of the load of a 735 kV line and the outdoor temperature. In this case, the load is influenced by human activities (daily cycle) and by outdoor temperature (season cycle) and by the place of the line in the network. Moreover, the magnetic field level can vary with the sagging of the conductors because of heating due to large current loads and environmental conditions [16] .



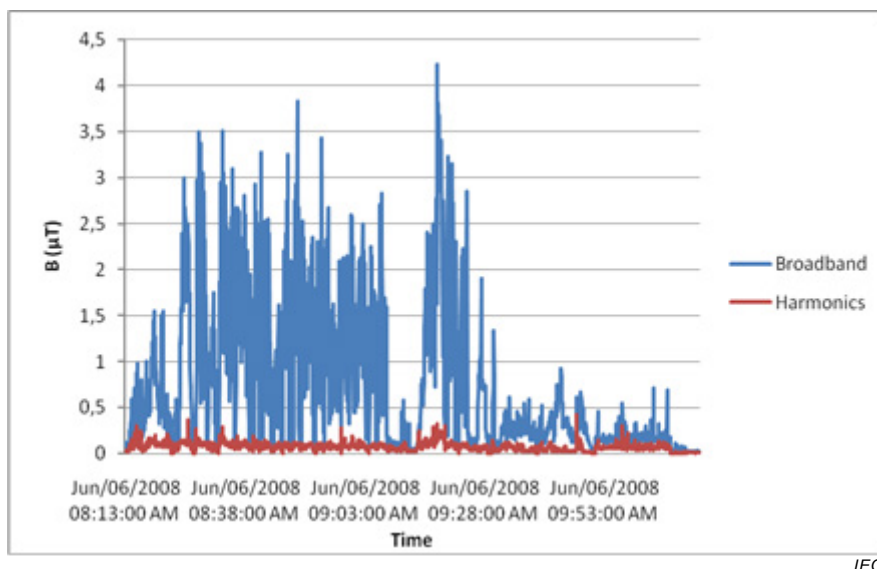
IEC

Figure 3 – Example of load variation of 735kV line due to the human activities (daily) and outdoor temperature (seasonal)

Method: Three-axis and single-axis magnetic field meters are available with output connections that can be used in combination with commercially available data loggers to record the variation of magnetic field levels at one or more locations, as a function of time. Three-axis exposure meters and magnetic field waveform capturing instrumentation can also be used to periodically record field levels. Because of the dependence of magnetic field levels on load currents, which can vary daily, weekly, seasonally (Figure 3), etc., the challenge is to determine a time interval for recording measurements that will capture enough variations of the field to obtain a valid statistical description. Conducting an initial pilot study in the measurement environment of interest can be useful for addressing the question of measurement sampling time.

Finding the temporal maximum of the magnetic field by measurement is not easy. For some simple situations, such as under single circuit power lines, this may be estimated by recording the current during the magnetic field measurement and extrapolation to the maximum load.

An additional consideration should be taken into account when measurements are performed in electric mass transportation systems or other areas where there are variable speed motors. For example, in trains, the magnetic field can be a function of the speed of the train (see Figure 4).



NOTE Broadband = 40 Hz – 800 Hz, harmonics = 100 Hz – 800 Hz.

Figure 4 – 50 Hz magnetic field in a high speed train in France

For the electric fields, unlike spot measurements of magnetic fields from power lines, the measured values will not change greatly because the voltages remain nearly constant. However, the electric field level can vary with the sagging of the conductors because of heating due to large current loads [16].

4.1.5 Characterisation of frequency content in magnetic field or electric field

Since (1) electric and magnetic fields from electrical equipment often contain power-frequency harmonics or frequencies unrelated to the power frequency, and (2) electric and magnetic field limits have been set as a function of frequency [17-19; 21], characterisation of the frequency content can be an important goal.

An example of a magnetic field that is rich in harmonics and that is produced by a common electrical appliance is shown in Figure 5. Figure 5a shows a waveform of the horizontal component of the magnetic field 10 cm away from the surface of the front-centre of an operating 66,04 cm (26 inches) flat-screen LCD television. The harmonic components in the field are indicated in Figure 5b, which shows a frequency spectrum for the waveform in Figure 5a. It is shown that the fundamental frequency is 50 Hz and significant levels of 3rd and 5th harmonics are included.

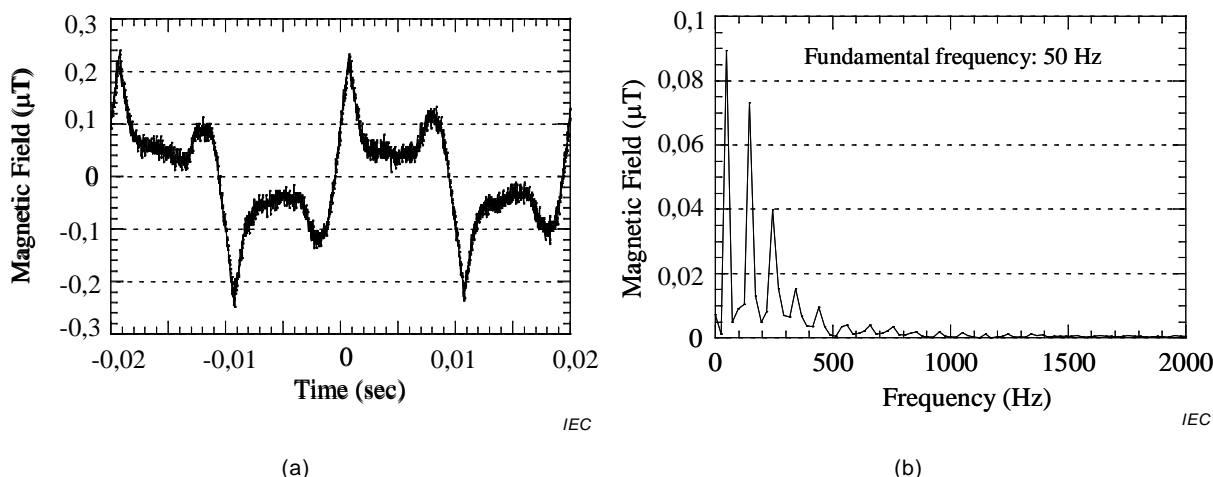


Figure 5 – Waveform (a) and frequency spectrum (b) of magnetic field generated by a 66,04 cm (26 inches) flat-screen LCD television

Method: Commercially available single-axis and three-axis magnetic field meters are sometimes provided with output connections that give an output voltage proportional to the magnetic field strength.

Such instrumentation, in combination with commercially available spectrum analysers, can be used to characterise the frequency components in the magnetic field. Alternatively, wave-capturing instrumentation has software that enables the determination of the frequency content from the recorded data. Magnetic field meters which can be switched to indicate rms field values of the power frequency and one or more harmonic frequencies are also available. More modern electric and magnetic field meters include a spectrum analyser.

It should be noted that the frequency content of magnetic fields produced by variable speed electrical equipment, e.g. electric mass transportation systems, can change as a function of speed [5].

The electric field of AC power systems has low total harmonic distortion. Therefore the harmonics of power frequency electric field are negligible [9].

4.1.6 Characterisation of population exposure to magnetic field and definition of metric

A number of epidemiological studies on occupational or residential exposure, that have examined the possibility of health effects from exposure to power frequency magnetic fields, have been conducted. From the magnetic field measurements, different statistic indicators can be defined.

Method: A more precise assessment of exposure is determined by wearing a small three-axis exposure meter that periodically records the field at a location of interest on the body.

Estimates of human exposure shall be made from a combination of spatial and temporal variation measurements and information which describes patterns of human activity [31].

Commercially available three-axis exposure meters that can be worn on the body can be used. Such instrumentation periodically records the resultant magnetic field value for periods of time extending to several days, depending on the frequency of sampling of the magnetic field, memory storage capacity and battery life. The sampling rate will depend in part on the model assumed for the interaction between the field and subject. The data collected can be downloaded to a computer, and software provided with the instrumentation or specially developed, is used to determine exposure to the parameters such as TWA (time weighted average), geometric mean, and several percentile values.

Past human exposures in specified areas should be estimated by having surrogates wearing exposure meters perform activities that were conducted in the past in the specified areas [27-28; 30]. This approach assumes that the magnetic field sources have not changed significantly over time.

4.2 Sources with multiple frequencies

4.2.1 General

If a source is not producing a single sinusoidal field, the field produced can be described as a superposition of sinusoidal fields with different frequencies. The spectrum of the field may consist of discrete spectral components or it may be continuous. Examples of sources producing a discrete spectrum are distribution power lines and AC/DC converters. These examples also have a harmonic spectrum, which means that spectral components occur only at integer multiples of one fundamental frequency. A non-harmonic discrete spectrum may be produced by two or more independent generators. In a continuous spectrum there are no discrete spectral components visible because it consists of an infinite number of spectral lines with infinite small spaces. The spectrum of a single impulse or burst is an example of a continuous spectrum. Also thermal noise produces a continuous spectrum. Of course discrete and continuous spectra may be superposed in a real spectrum.

The goal of this subclause 4.2 is to show how non-sinusoidal fields can be compared with the reference levels of existing guidelines or standards.

In the frequency range up to 100 kHz, the guidelines are based on short term effects such as stimulation of the nervous system [17-19; 21]. The other known biological effect is the thermal effect which can be neglected below 100 kHz. Reference [25] gives a very good summary of the literature dealing with neurophysiological effects of electromagnetic fields.

The guidelines define basic restrictions to characterise neurophysiological effects. As these basic restrictions are not measurable quantities, the guidelines introduce reference levels for external fields. Basic restrictions and reference levels are frequency dependant.

With the reference level we have a practical model which is valid for external sinusoidal fields. The reciprocal of the reference level curve can be seen as a transfer function from the external fields to the biological effect. If the spectrum of the external field strength multiplied with this transfer function results in value below one, we assume that the external field is in compliance with the corresponding safety standard.

The concept of transfer function can also be applied to non-sinusoidal fields. The multiplication of the spectrum of the external field with the transfer function results in a spectrum which is relevant for the exposure and which can be called the weighted spectrum. For a discrete spectrum this means that the field strength of each spectral component is divided by the reference level at the frequency of the spectral line. The question is now how to add the weighted spectral lines. The following methods are published.

4.2.2 Sum of weighted magnitudes

In references [19], [21] and [18] it is proposed to add the magnitudes of the weighted spectral lines.

For example, reference [21] proposes the following criteria for magnetic field:

$$\sum_{j=1}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1$$

where

H_j is the magnetic field strength at frequency j

$H_{R,j}$ is the reference level at frequency j defined in reference [21]

This method usually overestimates the exposure because it does not use the phase information of the spectrum.

4.2.3 Weighted peak value

An ICNIRP statement [20] showed clearly that the sum of weighted magnitudes method is only a worst case estimation because the phase of the weighted spectral lines is not taken into account. It is proposed to take the phase of the source spectrum into account and transform the weighted spectrum into the time domain. The peak value of the resulting weighted time domain signal is finally the relevant exposure measure. For the magnitude of the transfer function the reciprocal of the reference level curve is used. The phase of the transfer function is derived from the steepness of the reference level curve.

A method which works completely in the time domain is also proposed in reference [20]: in this method the time domain signal of the field is convolved with the impulse response of a weighting filter. The transfer function of this weighting filter is identical to the transfer function already described for the frequency domain method. Again the peak value of the weighted time domain signal is the relevant exposure measure.

Mathematically there is no difference between the two proposed methods because multiplication in the frequency domain is exactly the same as convolution in the time domain. In Clause 8 of IEC 62311:2007 [11] the weighted peak method is also described in detail. The weighted peak method using the convolution approach is already available in commercial measurement instruments. These instruments work in real time, are very easy to use and can be used for arbitrary signals. Especially pulses, bursts or noise-like signals can be evaluated in the sense of references [20] and [11].

4.2.4 Impulse separation

For signals with arbitrary temporal behaviour an evaluation of the time domain signal is proposed in 5.3.2 of reference [1]. It is described in detail for magnetic fields only. The time domain signal of the field is divided into a sequence of single impulses. From the duration of each impulse a corresponding frequency is calculated which is used to select the proper reference level for each impulse. In the general case the peak value of the time derivative of each magnetic field impulse must then be compared with the peak value of a sinusoidal signal at the reference level multiplied with its corresponding angular frequency.

In many cases this procedure gives the same results as the weighted peak method described in references [20] and [11] if the same reference levels are applied, if the impulses are separated correctly and if the corresponding frequencies of the impulses are extracted correctly. The reason for this similarity is that the same physical and neurophysiological effects are the basis of both methods. The interpretation of these effects is however somewhat different. The task to separate the time domain signal into single impulses and to extract the relevant parameters is not an easy one and not well defined. Therefore, the reproducibility of this method is not good.

4.2.5 Weighted RMS value

In [10] it is proposed to add the squares of the magnitudes of the weighted spectral components in a first step and then take the square root of this sum in a second step as a measure of the actual exposure. According to Parseval's theorem the RMS value of the weighted time domain signal is exactly the same. In reference [10] an averaging time of one second is proposed for the time domain method. This method was introduced to avoid the overestimation which could occur by summing the magnitudes directly. Also in reference [11] the frequency domain version of this method is proposed as a mean of avoiding

overestimation. However there is no neurophysiological rationale for this approach. Therefore this procedure might underestimate the real situation.

4.2.6 Highest weighted spectral line

In reference [1] the absence of additive effects of different spectral components regarding the neurophysiological effects is assumed. According to 5.3.3 of reference [1] it is sufficient to show compliance of each spectral component separately if the spectrum consists of a limited number of harmonics and if the amplitudes of these harmonics decay with frequency. For the rationale of this approach reference [8] is cited in reference [1]. It is worth noting that [8] is only an abstract. It is also worth noting that the method described in 5.3.2 of Ref. [1] can give much more conservative results.

4.2.7 Conclusion and recommendation

We have seen that there is a broad range of methods to assess fields with multiple frequencies. From the current point of view the weighted peak method should be used because it has the lowest risk for overestimation as well as for underestimation. It also produces stable and predictable results with a minimum of work for the operator.

4.3 Considerations before measurements

Before carrying out measurements it is useful to have an idea of the distribution of the field that is to be measured. For this the following information is required (when possible):

- identification of the sources of the field;
- geometric characteristics of the source;
- load of the sources (defined in terms of current, power, etc.);
- pictures or maps to adequately describe the areas where measurements will be carried out;
- up-to-date electrical diagrams;
- atmospheric conditions;
- areas accessible to public or workers;
- presence of metallic objects.

NOTE While many sources of magnetic fields are visible (e.g. overhead lighting, electrical appliances), others are not (e.g. electrical equipment in adjacent rooms or on upper or lower floors).

It may be necessary to conduct a pilot study before the final measurements. The extent of this pilot study will depend on the context. It may be only a rapid scan of the area, in order to look for the maximum field. It may be more detailed in order to take decisions regarding spacing between measurements, measurement heights, sample size, formats of data sheets, questionnaires for job/task classification, etc.

In the pilot study, the presence of harmonics should be checked. If it can be demonstrated that harmonics are negligible, that is if the difference of exposure measured with and without harmonics is less than 5 %, then it is not necessary to measure them in the main study.

The measurement range of the instrumentation should also be checked in the pilot study. Some instruments are automatic ranging: this may be more convenient, for example if the levels of fields are very different in different places. Automatic range should not be used for transient signals.

When the goal of the measurement is an epidemiological study, a pilot study shall be done as part of the process for developing a final measurement protocol.

5 Measurement procedures and precaution

5.1 AC magnetic field

When developing a measurement method and protocol, the following sources of magnetic fields and items shall be considered when applicable:

- the electric sources serving the facility;
- types and locations of transformers;
- locations of main cables and circuit-breakers;
- magnitude of supply voltages and periods of peak power use;
- frequencies (including 0 Hz) of power supplies and electrical devices;
- location of people relative to known field sources;
- location of measurement relative to the human body, e.g. head, trunk,;
- presence of any motors and generators;
- presence of small heaters;
- presence of air-core coils used in air core compensation reactors and in filter coils
- earthing systems and connections.

Magnetic flux density measurements shall be made with three-axis instruments and shall be of the resultant magnetic field,

Using single-axis instruments is possible in some cases, e.g. to know the direction of the field and the maximum magnetic field, or in order to investigate the orientation and shape of the magnetic field ellipse, and in cases when the direction of a linearly polarized field is already known.

Some three-axis instrumentation can also determine the field parameters mentioned above.

The size of the probe or sensing elements shall be appropriate to the spatial variation of the field that is measured. The sensing elements should be of area 0,01 m² or smaller (5.8.2 of IEC 61786-1:2013).

The pass-band of the instrument shall be appropriate to the frequency content of the field being measured. Where the field is such that the pass-band of the instrument could significantly affect the reading (i.e. where more than one frequency is present in the field), the pass-band shall be recorded and included in the report.

When the magnetic field is produced by a power system, the frequencies present will usually be the fundamental (50 Hz or 60 Hz), plus the first few harmonics. The minimum pass-band used for measuring such fields shall extend from the fundamental frequency to 800 Hz. A narrower pass-band may be used only if it can be demonstrated that the harmonic content is sufficiently small for the measurement result to be negligibly different, e.g. near power lines, or if there is a specific reason for measuring a narrower range of frequencies.

When measuring the fields produced by sources other than the power system, the pass-band shall be chosen appropriately. Fields produced by some transportation systems have a lower fundamental frequency, while induction heaters, video display terminals, commercial airplanes, ships, and the harmonics produced by variable speed motors can produce fields with higher frequencies.

When extending the pass-band to lower frequencies, care shall be taken to avoid errors caused by the motion of coil probes in static fields. Such errors can generally be avoided by holding the coil stationary or by selecting an appropriate frequency range.

Measurements in an approximately uniform magnetic field correspond to exposure of the whole human body if present at the measurement location at the time of the measurements. This is the case under power lines [9] .

It is possible to use the concept of average exposure levels when the distance between the source and the body is greater than 20 cm. In order to determine the average exposure levels, the field shall be measured at different heights and positions, taking into account the position of the human body, and the results averaged. IEC 62110 gives a protocol for measuring public exposure to magnetic field emitted by electric installations, which defines 3 heights of measurements [9] .

Averaging in this way over the human body shall not be used when the distance is shorter than 20 cm.

The measurement protocol shall specify the measurement distances between the measurement point and the sources (or the walls or fences or surfaces). This distance should be by default 20 cm. Some standards define distances of measurement in specific situations (see Annex B).

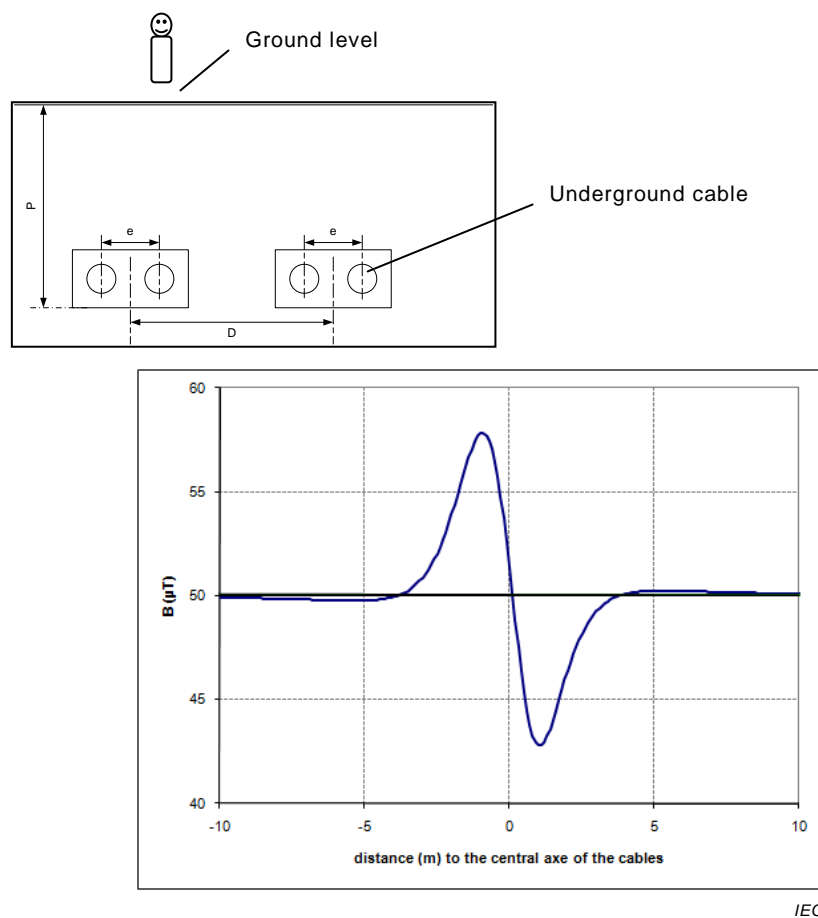
As part of the process for developing a measurement protocol for determining human exposure to magnetic fields, the measurement goals and methods for achieving them shall be clearly indicated. A clear definition of the goals is needed to determine instrumentation and calibration requirements, e.g. instrumentation pass-band, magnitude range, and frequency calibration points. The measurement protocol should indicate which field parameter(s) shall be measured, where the measurements shall be performed, and how the measurements shall be performed. It is important to note that, in general, a single measurement protocol will not be suitable for all measurement situations.

The magnetic field is proportional to the current and so may vary during the measurements. So, this variation shall be known in order to interpret the results. This could be done by recording the current in the load or by recording the magnetic field at a fixed place during the measurements.

5.2 DC magnetic field

The main difference between measuring AC and DC magnetic fields is the influence of the geomagnetic field.

In the case of DC electric networks, the protocol should be derived from IEC 62110. If the DC line is undergrounded, the DC field at the location of the body should be considered as uniform (in the sense of IEC 62110), so that a measurement at 1 m height should be sufficient. The uniformity of field can be a priori assessed by calculation (Figure 6).



IEC

$P = 1,4 \text{ m}$ $D = 1,05 \text{ m}$ $e = 35 \text{ cm}$ $I = 926 \text{ A}$

polarities of I in each cable = + - - +

geomagnetic field is 50 μT with angle of 60° to the bottom and aligned with the cable

Figure 6 – Example of DC magnetic field profile above DC underground cable (calculated at a height of 1 m)

The geomagnetic field shall be measured at the beginning and at the end of the measurements, on each side on the cable. As the geomagnetic field and the DC field emitted by the cables are vectors, it is not possible to simply subtract the geomagnetic field component. The measured magnetic field shall be reported, as it is. The geomagnetic field component shall also be reported.

5.3 AC electric field

Unperturbed field measurements shall be made with three-axis instruments and shall be of the resultant electric field.

Using single-axis instruments is possible in some case, e.g. when the direction of the field is already known

The pass-band of the instrument shall be appropriate to the frequency content of the field being measured. Where the field is such that the pass-band of the instrument could significantly affect the reading (i.e. where more than one frequency is present in the field), the pass-band shall be recorded and included in the report.

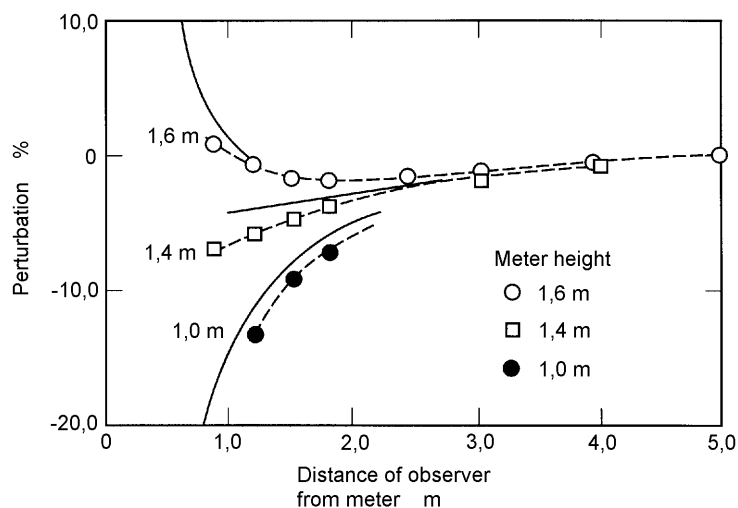
When electric fields are produced by electric power systems, i.e. power lines, transformers, and so forth, the predominant frequency is the power frequency 50 Hz or 60 Hz. An

instrument with a narrow pass-band centred about the power frequency will be suitable in such cases for measuring the rms value of the electric field.

When measuring electric fields from other sources, e.g. on commercial aeroplanes, ships, and some electric trains, the fundamental frequency can differ significantly from 50 Hz/60 Hz, and the pass-band shall be chosen appropriately.

During electric field measurements, particular attention should be given to avoiding proximity effects of the observer as well as other people who may be in the vicinity of the field probe. Significant perturbation of the field can occur, capable of introducing unacceptable errors in the measurement.

Figure 7 shows the perturbation of the electric field measurement in percentage as a function of the observer distance from the probe and the field meter height above ground [7]. The data points represent measured perturbations beneath a 500 kV transmission line due to a 1,80 m tall grounded observer (arms at side). Proximity effects are shown for three heights of the field meter above the ground plane. The solid curves are theoretical predictions. Because the observer's potential is frequently close to ground potential due to leakage resistance and capacitance to ground, the proximity effects in Figure 7 can be regarded as typical.



IEC

Figure 7 – Observer proximity effects during electric field measurements in vertical electric field

The observer proximity effects for free-body meters in other geometries, which may be greater or less than those shown in Figure 7, can be determined experimentally. The proximity effect may be determined by noting changes in the field value as a function of the observer distance from the centre of the probe.

So a minimum distance of 2 m shall be respected between operator and probe [4].

Electric fields are very easily perturbed by the presence of conductive objects, even if these objects are poor electrical conductors (trees, fences, vegetation, buildings... etc.) [4]. All movable objects should be removed whenever possible. If not, then the distance between the probe and the object should be equal to at least three times the height of the object (non-permanent object) or to 1 m (permanent object), if possible. Objects that cannot be removed shall be listed, indicating their dimensions and location [4].

The probe shall be put on an insulated tripod (see 5.8.4 of IEC 61786-1:2013).

Electric field measurements may be in error if the relative humidity is more than 70% (see 5.5 of IEC 61786-1:2013).

It should be recognized that measurements in an approximately uniform electric field correspond to exposure of the whole human body if present at the measurement location at the time of measurements. Electric field measurements in non-uniform fields have a more restrictive interpretation when determining human exposure, i.e. the field measurement represents human exposure only for that portion of the human anatomy which would coincide with the measurement location.

As part of the process for developing a measurement protocol to determine human exposure to electric fields, the measurement goals and methods for achieving them shall be clearly indicated. A clear definition of the goals is needed to determine instrumentation and calibration requirements, e.g. instrumentation pass-band, magnitude range and frequency calibration points. The measurement protocol shall indicate which field parameter(s) should be measured, where the measurements shall be performed, and how the measurements shall be performed. It is important to note that, in general, a single measurement protocol will not be suitable for all measurement situations.

6 Measurement uncertainty

Measurement uncertainty shall be assessed in compliance with ISO/IEC Guide 98-3. This standard requires that the standard deviation associated with each quantity influencing the measurement shall be determined on the basis of measurements performed (type A) or on the basis of experience (type B).

Decisions should be made regarding the total uncertainty permissible during measurements (instrumental uncertainty requirements are given in Clause 5 of IEC 61786-1:2013).

In order to determine the total uncertainty associated with rms measurements of the electric or magnetic field in different measurement environments, there should be an appropriate accounting of the various sources of uncertainty. Possible sources of uncertainty identified in Clause 6 of IEC 61786-1:2013 and in Annex C are as follows:

- **Uncertainty type A**
 - calibration uncertainty;
 - repeatability of the measurement;
 - reproducibility of the measurement;
- **Uncertainty type B**
 - correction factor;
 - averaging effects of coil probes during non-uniform field measurements;
 - errors in positioning the probe in non-uniform fields;
 - frequency response or pass-band limitations (choice of the filter);
 - instrument measurement time constant;
 - metrological drift;
 - resolution;
 - temperature;
 - proximity to objects or obstacles;
 - humidity (only for electric field);
 - hysteresis of scale in automatic range mode.

Some sources of uncertainty can be reduced to negligible levels. For example, stands fabricated from insulating materials may be used for precise positioning of the field meter probe.

Known correction factors should be applied to readings obtained when possible.

This may be complex due to the fact that the correction factors are defined for each axis.

Similarly, it should be recognized that uncertainties during the measurement of electric or magnetic fields from appliances or other electrical equipment, as a function of the distance from the source, can become very great (e.g. exceeding 100 %) as the field level from the source approaches the value of the background field.

The combined standard deviation u_c shall be obtained as the square root of the sum of the variances (i.e. the square root of the sum of the squares of the standard deviations):

$$u_c = \sqrt{\sum_1^m c_i^2 u_i^2}$$

where c_i is the sensitivity coefficient and u_i is the standard uncertainty

The expanded (total) uncertainty u_e shall be k times the combined standard deviation, where k is the coverage factor.

The coverage factor shall be taken as 2 which, for normal Gaussian distributions, will correspond to a confidence interval of approximately 95 %.

$$u_e = 2u_c$$

Annex D gives an example of assessment of measurement uncertainty.

7 Measurement report

The information that is required when recording and reporting the results of measurements can vary depending on the goals of the measurements. A clear indication of the measurement goals shall be provided at the outset. The following information pertaining to the instrumentation and measurements shall also be provided when appropriate:

- description of the measurement procedure;
- identification of manufacturer;
- identification of instrument model and probe;
- instrument bandwidth;
- date of last calibration/verification test;
- date of measurements;
- time of measurements;
- identification of personnel performing the measurements;
- weather conditions;
- humidity (for electric field only);
- source description, for example frequency and signal characteristics;

- source conditions, i.e. current loading;
- frequency resolution of spectra for fields containing multiple frequencies;
- a clear indication of what field quantity is being reported, e.g. the maximum field, the resultant field, the vertical field component, time-weighted average (TWA), rms value, etc. (SI units should be used; common units may be expressed in parentheses);
- descriptions of human activity when human exposure data is presented;
- drawings which describe the area and locations where measurements are performed; with photos if possible;
- localisation of the reference measurement point, with GPS coordinates if possible;
- geomagnetic field when measuring DC magnetic field;
- statistical information, e.g. the largest and smallest field values, median, geometric mean, etc.;
- total measurement uncertainty;
- conclusion regarding the goals of measurement;
- distance to the source.

Annex A (informative)

Examples of fields characteristics in typical environments

Knowledge of the field characteristics leads to the right choice of instrumentation and measurement procedure. In general, workers have access to environments where the electric and magnetic field intensities can be higher than those that are accessible to the public. In most cases, the two environments are naturally delimited by physical boundaries. For example, in substations or enclosures for medium voltage installations, there are areas where access is restricted to workers.

In general the public is exposed to higher fields close to the power line than far away from them.

The design of high voltage and high current equipment is optimized to reduce the field produced by electric installations.

Due to the nature of the work, for example live line inspection or maintenance, workers may have access to areas where there are higher levels of field. The field intensities are relatively high at ground level in the substations beneath bus bars, close to the connections of alternators in the power stations and close to the phase conductors of overhead lines during live-line maintenance. Other examples of sources of high magnetic field at work include welding machines, electrolysis, induction heating, etc...

The order of magnitude of power frequency fields in areas accessible to workers and to the public in a North American utility substation installation and for the right of way (ROW) of power lines is summarized in Table A.1.

Table A.1 – Example of field characteristics inside (workers environment) and outside (public environment) electric substations in a North American utility

Electric field		Magnetic field		
<i>Area accessible to workers</i>	<i>Area accessible to public</i>	<i>Area accessible to workers</i>	<i>Area accessible to public</i>	
Maximum value at 2 m above ground under bus bar in substation 13,6 kV/m or higher	Maximum value between 1 m and 10 m from the substation fences, around 1 kV/m	1 000 μT in the vicinity of blocking inductance	4 μT outside the substation fence	Different areas in a 735 kV substation
Maximum value at 1 m above ground 10 kV/m		Maximum value at 1 m above ground 30 μT		Beneath power line
Computed value of electric field can reach 80 kV/m at the workplace, where workers are required to wear a conductive suit for reducing electric field at body level.		Computed value can reach 150 μT /kA load in a bundle of 4 sub-conductors (close intervention can be only done with a bucket roll over the bundle, current load is split between sub-conductors of the bundle)		Live line maintenance at the phase conductor level

The statistics of magnetic field exposure of 3 workers in a power plant are presented in Figure A.1. This illustrates the percentage of exposed time (Figure A.1a) and intensity-time

product (Figure A.1b) of magnetic field during 3 work days. This example does not intend to be representative of all possible workers exposure in a power plant.

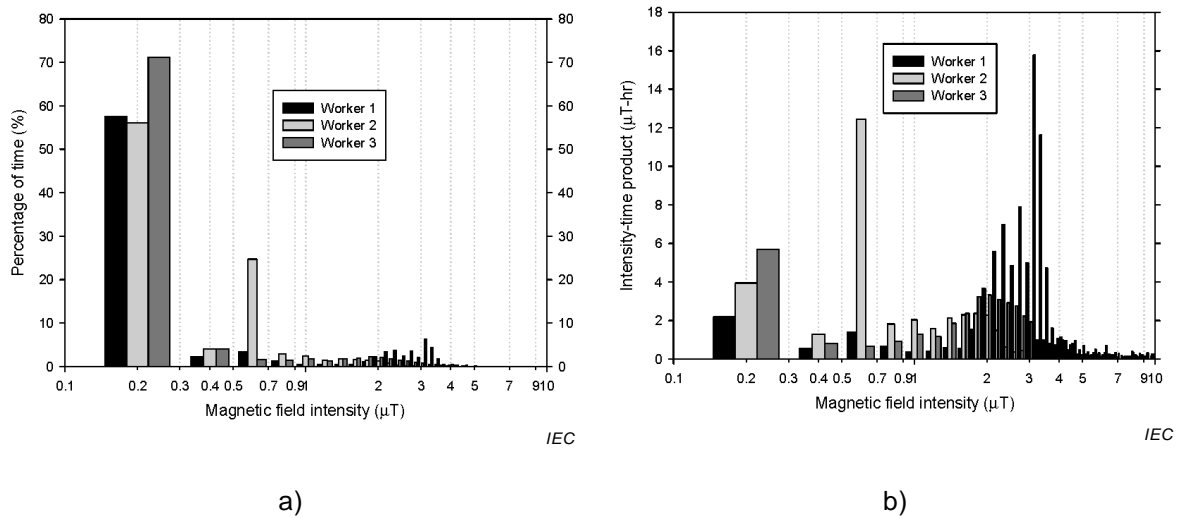


Figure A.1 – Magnetic field exposure of typical worker (electrician) in North American power plant (based on 3 days recording)

Mass transit systems can produce field at higher frequency than power frequency. These field characteristics for public exposure are presented in Table A.2 [6]. The field in these systems can vary during the acceleration and deceleration of the vehicle.

Table A.2 – Field characteristics (μT) in different mass transportation system in US: average and (maximum)

Transportation system	“Static” < 5 Hz	Extremely low frequencies 5 Hz to 3 000 Hz	Low extremely low frequency 5 Hz to 55 Hz	Power frequency 60 Hz	Power harmonics 65 Hz to 300 Hz	High extremely low Frequencies 305 Hz to 3 000 Hz
Ferry	51,1 (76,0)	0,06 (0,33)	0,02 (0,10)	0,04 (0,31)	0,02 (0,12)	0,01 (0,03)
Escalator	55,7 (95,8)	0,15 (6,14)	0,13 (6,01)	0,04 (0,32)	0,02 (1,05)	0,01 (0,03)
Moving walkway	57,6 (121,8)	0,37 (20,0)	0,31 (19,54)	0,12 (1,24)	0,07 (3,72)	0,03 (1,90)
Conventional cars and light trucks	32,1 (96,8)	0,57 (12,45)	0,55 (12,45)	0,09 (1,94)	0,08 (1,36)	0,04 (0,78)
Electric cars and light trucks						
Dynamometer	40,8 (128,6)	0,57 (8,08)	0,34 (5,61)	0,09 (1,25)	0,36 (7,99)	0,1 (0,86)
Test track	38,8 (104,1)	0,57 (9,35)	0,48 (9,27)	0,08 (1,53)	0,19 (2,45)	0,07 (0,69)
Jetliner	55,2 (66,9)	1,35 (21,25)	0,06 (0,35)	0,00 (0,06)	0,02 (0,81)	1,35 21,24
Shuttle tram (AC electric)	47,0 (83,5)	1,37 (9,04)	1,07 (8,85)	0,55 (2,90)	0,30 (1,44)	0,12 (0,70)
Conventional bus	40,1 (112,4)	1,68 (14,57)	1,64 (14,42)	0,09 (1,42)	0,19 (2,13)	0,21 (2,48)
Electric shuttle bus	38,1 (80,8)	2,04 (48,78)	1,47 (48,67)	0,08 (3,88)	0,89 (22,05)	0,16 (1,07)
Commuter train	53,8 (196,9)	4,96 (79,93)	1,85 (45,35)	3,42 (73,88)	1,46 (34,03)	0,59 (4,87)

Depending on the environment, the electric or magnetic field may not be uniform in the area of interest. For example, IEC 62110 [9] explains that in the public environment field under power line can be considered as uniform, while the field above an underground line is not uniform.

Annex B (informative)

Examples of measurement distances

B.1 IEC 62110:2009 [9]

h is the height of the measurement and d is the distance to the source.

- Single point: $h = 1$ m
- Three-point: $h = 0,5$ m – 1 m – 1,5 m and $d = 0,2$ m
- Five-point: $h = 0,2$ m and $d = 0,5$ m from centre
- Around substations with overhead lines connected to the substation: $h = 1$ m and $d = 0,2$ m

B.2 IEC 62233: 2005 [10]

- Appliances used in contact with the relevant parts of the body: 0 cm
- Other: 30 cm
- Particular cases: Facial sauna appliances, hairdryers, water-bed heaters: 10 cm
- Induction hobs and hotplates: $d = 30$ cm, height h between 1 m above the cooking zone and 0,5 m below the cooking zone.

B.3 IEC 62311:2007 [11]

Distance (source to user): the distance used for the assessment shall be specified by the manufacturer and be consistent with the intended usage of the equipment.

B.4 IEC 62369-1:2008 [12]

The usual measurement distances from electronic article surveillance devices (EAS) are 20 cm / 30 cm. The measurement is based on a grid every 10 cm or 15 cm over the torso and the head (minimum height of 85 cm). More data are given in [12], describing the grid of measurement in function of the type of EAS systems.

B.5 IEC/TS 62597:2011 [14]

- Rolling stock:
 - Workers inside:
 - SURFACE METHOD → $h = 0,5$ m – 1 m – 1,5 m
 - VOLUME METHOD → $h = 1$ m – 1,5 m and $d = 0,3$ m
 - Public inside:
 - SURFACE METHOD and VOLUME METHOD → $h = 0,3$ m – 1 m – 1,5 m and $d = 0,3$ m
 - Workers and public outside:
 - SURFACE METHOD and VOLUME METHOD → $h = 0,5$ m – 1,5 m – 2,5 and $d = 0,3$ m

- Fixed installation:

$h = 1 \text{ m}$ or $1,5 \text{ m}$

$d = 10 \text{ m}$ (main line) $d = 3 \text{ m}$ (urban transport)

AREAS CLOSED TO FIXED POWER SUPPLY INSTALLATIONS:

Choose between two sets: $h = 0,5 \text{ m} - 1 \text{ m} - 1,5 \text{ m}$ or $h = 0,3 \text{ m} - 0,9 \text{ m} - 1,5 \text{ m}$

PLATFORMS: $h = 0,5 \text{ m} - 1 \text{ m} - 1,5 \text{ m}$ and $d = 0,3 \text{ m}$

B.6 IEC 62493:2009 [13]

Figure B.1 – Lighting equipment and measurement distances (from [13])

Type of lighting equipment	Measurement distance (cm)
Hand lamps ^a	5 ^a
Table lighting equipment	30
Wall lighting equipment	50
Up lighter	50
Suspended lighting equipment	50
Ceiling and/or recessed lighting equipment for fluorescent lamps with an input power ^b ≤ 180 W	50
Ceiling and/or recessed lighting equipment for fluorescent lamps with an input power ^b > 180 W	70
Ceiling and/or recessed lighting equipment for discharge lamps with an input power ^b ≤ 180 W	70
Ceiling and/or recessed lighting equipment for discharge lamps with an input power ^b > 180 W	100
Portable lighting equipment	50
Flood lights	200
Lighting equipment for road and street lighting	200
Lighting chains	50
Lighting equipment for swimming-pools and similar applications	50
Lighting equipment for stage lighting, television and film studios (outdoor and indoor)	100
Lighting equipment for use in clinical areas of hospitals and health care buildings	50
Ground recessed lighting equipment	50
Aquarium lighting equipment	50
Plug- in night lights	50
Self ballasted lamps	30
UV and IR radiation equipment	50
Transport lighting (installed in the passenger compartment of buses and trains)	50
Other lighting equipment not mentioned in this table	50
^a Measurement distance should be 30 cm and the measured value should be calculated to a distance of 5 cm (equation; $1/r^3$).	
^b Total nominal power of the lighting equipment.	

Annex C (normative)

Measurement uncertainty

C.1 Overview

Once a valid calibration of a field meter has been performed, the number of mechanisms that can cause measurement errors is small. Sources of uncertainty that should be considered and combined with calibration uncertainties, when appropriate, are given below.

NOTE In some cases in Clauses C.2 and C.3, quantitative estimates of uncertainty are provided (e.g. effects of non-uniform fields), while in others brief guidance is given for its determination (e.g. temperature effects). For other uncertainty sources, attention only is directed to their possible influences.

C.2 Assessment of type A uncertainty

Uncertainty of calibration: the value is available in the certificate of calibration

Repeatability of measurement (see 3.4). Conditions of repeatability include:

- the same protocol of measurement;
- the same observer;
- the same meter used in the same measuring conditions;
- the same location for measurement;
- a short delay between repetitions (few minutes).

Reproducibility of measurement (See 3.5). Conditions of reproducibility include:

- different field meters or meter types;
- different protocol of measurement;
- different observers;
- different conditions of measurement;
- different time of measurement.

The coefficient of reproducibility can be determined by participating to inter-laboratories comparisons.

C.3 Assessment of type B uncertainty

C.3.1 Non-uniform field

Possibly the greatest uncertainties occur when measurements of highly non-uniform magnetic fields are made manually close to such sources as electrical appliances. Three-axis probes that do not have a common centre, e.g. in exposure meters, will sample the field at different locations. In addition, the magnetic field meter probes are normally calibrated in a nearly uniform magnetic field and are being used to measure a field that can vary as $1/d^3$ with d the distance to the source. While the centre of the probe is usually considered to be the measurement location, the magnetic field reading is actually an average of the normal component of the magnetic field over the entire cross-sectional area of the probe. In some cases, the average field can differ significantly from the central field value.

Uncertainties related to positioning the magnetic field probe more precisely with well-defined orientations may be reduced with the use of adjustable stands fabricated with non-conducting materials.

Although electric field meters are calibrated in a nearly uniform field, they may normally be used with small uncertainty for measurements in non-uniform fields. Furthermore, a minimum distance to objects shall be maintained (see 5.3). Consequently, the uncertainty caused by the non-uniformity of the electric field will be negligible for many practical cases.

C.3.2 Pass-band limitations

A limited pass-band can contribute to measurement uncertainty and lead to differences in measurement results. For example, the measurement of magnetic fields from some video display terminals (VDTs), using a power frequency field meter (i.e. a field meter with a narrow pass-band centred about 50/60 Hz), can differ by more than 20 % compared with measurements performed using field meters with broader pass-bands [24]. This occurs because the VDT magnetic field is rich in harmonics that cannot be detected with a power frequency meter. If the magnetic field contains no power frequency component, the difference or error could be much larger.

To minimize signals from the probe due to motion of the probe in the earth's magnetic field, the high-pass corner frequency of the detector circuit's filter may be increased, provided that the higher frequency does not compromise the measurements, e.g. measurements of $16^{2/3}$ Hz and 25 Hz magnetic fields from some electric trains.

C.3.3 Temperature

The influence of temperature on the operation of the field meter is another possible source of uncertainty. If extreme differences in temperature are anticipated at a measurement site, compared to the temperature at the time of calibration, the effects of ambient temperature should be known or characterised. If the temperature is outside the range recommended by the manufacturer, the influence of temperature may be determined under calibration conditions (IEC 61768-1) while the field meter is in an environmental chamber. The influence of the temperature is characterised by a multiplication factor per °C or °K.

C.3.4 Humidity

The effect of humidity is negligible on magnetic field measurement.

Humidity can have an influence on electric field meters. Under high-humidity conditions, a layer of surface condensation may form on parts of an electric field meter. The major source of uncertainty comes from handle leakage through the mounting insulation to one of the electrodes. If significant, this leakage will greatly increase the currents induced in the probe and the resulting field meter reading. A much smaller uncertainty is associated with leakage between the two sensing electrodes, which would reduce the reading of the field meter. The field meter, its handle assembly, and its internal insulation should be kept clean and dry to minimize errors due to leakage currents.

The influence of ambient humidity on the performance of electric field meters may be determined by calibration with the field meter in an environmental chamber. Effect of humidity is negligible on electric field measurement when humidity is less than 70 % (IEC 61786-1, [23])

C.3.5 Location of measurement

Measurement uncertainties can occur during measurements of non-uniform magnetic and electric fields because of uncertainty in the measurement location. The variation of the measured field B in relation to distance r can be described according to the relation

$$B = K \left(\frac{1}{r^\alpha} \right) \quad (\text{C.1})$$

where

$1 \leq \alpha \leq 3$ for most cases,

K is a constant, i.e. the alternating field has a constant rms value.

Differentiating equation (C.1) with respect to r yields

$$\partial B = B \left(-\frac{\alpha}{r} \right) \partial r \quad (\text{C.2})$$

Assuming a rectangular distribution for the uncertainty in r , the standard deviation in the value of B , s_d , due to uncertainties in $r(\Delta r)$ can be shown to be

$$s_d = \pm \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \frac{\Delta r}{r} B \quad (\text{C.3})$$

For example, assuming a dipole magnetic field source ($\alpha = 3$), $\Delta r = 2$ mm, and $r = 500$ mm, $s_d = \pm 0,007B$.

C.3.6 Long-term drift

Because of gradual changes in instrument components over time, changes in the field meter response may occur. Periodic verification of the calibration (see IEC 61786-1:2013, Clause 6) provides a means of determining the extent of long-term drifts and correction factors.

C.3.7 Instrument time constant

Another source of uncertainty is that due to the time constant of the detector circuitry. For example, if a meter with a digital display is read too soon after being placed in a high field, an erroneous reading may occur. Erroneous readings may also occur for rapidly fluctuating fields because of inadequate signal processing time.

A distinction should be made between uncertainty of measurement, which can be made quite small with proper instrument design and careful calibration, and variability of the field because of temporal and spatial variations. Temporal and spatial variations of the field can far exceed uncertainties in a measurement, and are considered in Clause 5.1.

C.3.8 Proximity effect of observer (for electric field)

The proximity of an observer is negligible if the distance between the observer and the electric field probe is greater than 2 m.

C.3.9 Correction factor

This factor is given in the certificate of calibration. For a three axis meter, it could be 1 value or 3 values (1 value being a mean). So care should be taken in the use of correction factors.

An example of the use of a correction factor is given in Annex D.

C.3.10 Hysteresis between scales

When using a field meter in automatic scale, care should be taken at changes of scales. For example, when the measured field is close to the scale value, a small variation of the field could change the scale. The measured field would then be at the lower part of the upper scale, which could induce an additional uncertainty.

Annex D (informative)

Example of measurement uncertainty

Table D.1 gives an example of an uncertainty calculation for the measurement of magnetic field in the public area under a 50 Hz very high voltage overhead line. The measuring equipment used is a NARDA EHP-50C probe connected to a PMM 8053B with the measurement scale of 100 μ T. The measurements are performed at 1 m above the ground.

The sources of uncertainty taken into account for the analysis of the measurement system are described in Annex C.

Table D.1 – Example of measurement uncertainty

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	Type A					
Calibration of EHP-50C	A1	0,50 %	Normal	2	1	0,25 %
Repeatability	A2	4,00 %	Normal	2	1	2,00 %
Reproducibility	A3	4,00 %	Normal	2	1	2,00 %
Equipment	Type B					
Non-uniform magnetic field	B1	1,00 %	Rectangular	3,464	1	0,29 %
Pass-band limitation	B3	1,00 %	Rectangular	3,464	1	0,29 %
Instrument time constant	B7	0,20 %	Rectangular	3,464	1	0,06 %
Long-term drift	B8	4,00 %	Rectangular	3,464	1	1,15 %
Correction factor	B10	4,00 %	Rectangular	3,464	1	1,15 %
Resolution	B11	0,01 %	Rectangular	3,464	1	0,00 %
Hysteresis of caliber	B12	0,00 %	Rectangular	3,464	1	0,00 %
Temperature	B13	0,04 %	U	2,828	1	0,01 %
Humidity	B14	0,00 %	Rectangular	3,464	1	0,00 %
Combined standard uncertainty			$u_c = \sqrt{\sum_1^m c_i^2}$			3,09 %
Expanded uncertainty (95 % confidence interval)			Normal	$u_e = 2u_c$		6,19 %
Ambient temperature: between 0 °C and 40 °C, integration time: 1 s.						

Bibliography

- [1] BÖRNER, F., et al. *Electromagnetic fields at workplaces – a new scientific approach to occupational health and safety*. Bonn: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2011. ISBN FB400
- [2] BOTTURA, V., et al. Urban exposure to ELF magnetic field due to high-, medium- and low-voltage electricity supply networks. *Radiation Protection Dosimetry*, 2009, vol. 137, no. 3-4, p. 214-217
- [3] CAOLA, R.J., et al. Measurements of Electric and Magnetic Fields in and Around Homes Near a 500 KV Transmission Line. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1983, vol. PAS-102, no. 10, p. 3338-3347
- [4] 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
- [5] DIETRICH, F.M., et al. *Comparison of magnetic and electric fields of conventional and advanced electrified transportation systems*. 1993
- [6] DIETRICH, F.M. AND JACOBS, W.L. *Survey and Assessment of Electric and Magnetic Field (EMF) Public Exposure in the Transportation Environment*. 1999, no. Report No. PB99-130908.
- [7] DIPLACIDO, J., et al. Analysis of the proximity effects in electric field measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, vol. PAS-97, p. 2167-2177
- [8] HEINRICH, H. AND BÖRNER, F. *Summation Formulae – Facts and Fiction*. The Bioelectromagnetics Society 30th Annual Meeting. San Diego, 2008, p. 33-34
- [9] IEC 62110:2009, *Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure*
- [10] IEC 62233:2005, *Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure*
- [11] IEC 62311, *Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)*
- [12] IEC 62369-1:2008, *Evaluation of human exposure to electromagnetic fields from short range devices (SRDs) in various applications over the frequency range 0 GHz to 300 GHz – Part 1: Fields produced by devices used for electronic article surveillance, radio frequency identification and similar systems*
- [13] IEC 62493:2009, *Assessment of lighting equipment related to human exposure to electromagnetic fields*
- [14] IEC TS 62597:2011, *Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure*
- [15] IEEE STD 644-1994, *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*
- [16] IEEE STD 738-2006, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*
- [17] IEEE STD C95.1:2005, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*

- [18] IEEE STD C95.6:2002, *IEEE Standard for Safety Levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz*
- [19] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys*, 1998, vol. 74, no. 4, p. 494-522
- [20] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. *Health Phys*, 2003, vol. 84, no. 3, p. 383-387
- [21] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys*, 2010, vol. 99, no. 6, p. 818-836
- [22] KAUNE, W.T., et al. Residential magnetic and electric fields. *Bioelectromagnetics*, 1987, vol. 8, no. 4, p. 315-335
- [23] KORPINEN, L.H., et al. Influence of relative humidity on analyzing electric field exposure using ELF electric field measurements. *Bioelectromagnetics*, 2013, vol. 34, no. 5, p. 414-418
- [24] MISAKIAN, M., et al. Measurements of power frequency magnetic fields away from power lines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1991, vol. 6, no. 2, p. 901-911.
- [25] REILLY, J.P. *Applied Bioelectricity – from electrical stimulation to electropathology*. New-York: Springer, 1998. ISBN 0-387-98407-0
- [26] RENEW, D.C., et al. A method for assessing occupational exposure to power-frequency magnetic fields for electricity generation and transmission workers. *Journal of Radiological Protection*, 2003, vol. 23, no. 3, p. 279
- [27] SAHL, J.D., et al. Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among electric utility workers. *Epidemiology*, 1993, vol. 4, no. 2, p. 104-114
- [28] SAVITZ, D.A. AND LOOMIS, D.P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol*, 1995, vol. 141, no. 2, p. 123-134
- [29] SWANSON, J. Measurements of static magnetic fields in homes in the UK and their implication for epidemiological studies of exposure to alternating magnetic fields. *J. Radiol. Prot.*, 1994, vol. 14, no. 1, p. 67-75
- [30] THERIAULT, G., et al. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970-1989. *Am J Epidemiol*, 1994, vol. 139, no. 6, p. 550-572.
- [31] UK CHILDHOOD CANCER STUDY INVESTIGATORS, Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators. *Lancet*, 1999, vol. 354, no. 9194, p. 1925-1931.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	38
1 Domaine d'application	40
2 Références normatives	41
3 Termes et définitions	41
4 Considérations générales	42
4.1 Différents objectifs de mesure	42
4.1.1 Généralités	42
4.1.2 Caractérisation des niveaux de champ pour la conformité aux normes de sécurité	43
4.1.3 Caractérisation des variations spatiales	43
4.1.4 Caractérisation des variations dans le temps	45
4.1.5 Caractérisation du contenu fréquentiel du champ magnétique ou du champ électrique.....	47
4.1.6 Caractérisation de l'exposition des personnes au champ magnétique et définition de la mesure	48
4.2 Sources à plusieurs fréquences	49
4.2.1 Généralités	49
4.2.2 Somme des amplitudes pondérées.....	50
4.2.3 Valeur de crête pondérée	50
4.2.4 Séparation d'impulsion	50
4.2.5 Valeur efficace pondérée	51
4.2.6 Raie spectrale pondérée la plus élevée	51
4.2.7 Conclusion et recommandation	51
4.3 Considérations avant les mesures.....	51
5 Procédures de mesure et précautions.....	52
5.1 Champ magnétique alternatif	52
5.2 Champ magnétique statique.....	54
5.3 Champ électrique alternatif	55
6 Incertitude de mesure	57
7 Rapport de mesure	58
Annexe A (informative) Exemples de caractéristiques des champs dans des environnements classiques	60
Annexe B (informative) Exemples de distances de mesure	63
B.1 IEC 62110:2009 [9]	63
B.2 IEC 62233:2005 [10]	63
B.3 IEC 62311:2007 [11]	63
B.4 IEC 62369-1:2008 [12]	63
B.5 IEC/TS 62597:2011 [14].....	63
B.6 IEC 62493:2009 [13]	64
Annexe C (normative) Incertitude de mesure	65
C.1 Vue d'ensemble	65
C.2 Évaluation de l'incertitude de type A	65
C.3 Évaluation de l'incertitude de type B	65
C.3.1 Champ non uniforme	65
C.3.2 Limitations de la bande passante	66
C.3.3 Température	66

C.3.4	Humidité	66
C.3.5	Emplacement des mesures	67
C.3.6	Dérive à long terme.....	67
C.3.7	Constante de temps de l'instrument	67
C.3.8	Effet de proximité de l'observateur (pour le champ électrique).....	67
C.3.9	Facteur de correction	68
C.3.10	Hystérésis entre échelles	68
Annexe D (informative) Exemple d'incertitude de mesure.....		69
Bibliographie.....		70
Figure 1	– Niveaux de champ magnétique sous une ligne aérienne de transport de 77 kV (de [9]).....	44
Figure 2	– Niveaux de champ électrique sous une ligne aérienne de transport (de [9])	45
Figure 3	– Exemple de variation de charge d'une ligne de 735 kV due aux activités humaines (quotidienne) et à la température extérieure (saisonnnière)	46
Figure 4	– Champ magnétique 50 Hz dans un TGV en France	47
Figure 5	– Forme d'onde (a) et spectre de fréquence (b) du champ magnétique générés par un téléviseur LCD à écran plat de 66,04 cm (26 pouces)	48
Figure 6	– Exemple de profil de champ magnétique statique au-dessus d'un câble souterrain à courant continu (calculé à 1 m de haut).....	55
Figure 7	– Effets de proximité de l'observateur pendant les mesures de champs électriques dans un champ électrique vertical.....	56
Figure A.1	– Exposition au champ magnétique d'un travailleur (électricien) dans une centrale électrique nord-américaine (enregistrements sur 3 jours)	61
Figure B.1	– Équipement d'éclairage et distances de mesure (de [13])	64
Tableau A.1	– Exemple de caractéristiques du champ à l'intérieur (environnements de travail) et à l'extérieur (environnement public) de postes électriques dans une compagnie nord-américaine	60
Tableau A.2	– Caractéristiques du champ (μT) dans différents systèmes de transport en commun différent aux États-Unis: valeur moyenne et (valeur maximale)	62
Tableau D.1	– Exemple d'incertitude de mesure	69

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

Partie 2: Norme de base pour les mesures

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 61786-2 a été établie par le comité d'études 106 de l'IEC: Méthodes d'évaluation des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques en relation avec l'exposition humaine

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
106/322/FDIS	106/326/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/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

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

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

Partie 2: Norme de base pour les mesures

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61786 fournit des exigences pour la mesure des valeurs des champs magnétiques et électriques quasi-statiques avec un contenu fréquentiel compris 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.

De manière spécifique, la présente norme donne les exigences relatives à la mise en place de procédures de mesure permettant d'atteindre les objectifs définis quant à l'exposition humaine.

NOTE Les exigences en matière de mesureurs de champ et d'étalonnage sont décrites dans l'IEC 61786-1.

Compte tenu des différences de caractéristiques des champs par rapport aux sources dans les divers environnements (contenu fréquentiel, variations temporelles et spatiales, polarisation et amplitude, par exemple) et des différences d'objectifs des mesures, les procédures de mesure spécifiques sont différentes selon les environnements.

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 produisant des champs indépendants de la fréquence industrielle, la transmission d'énergie en courant continu, 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) pour les champs magnétiques et de 1 V/m à 50 kV/m pour les champs électriques.

Si des mesures hors de cette plage sont réalisées, la plupart des dispositions de la présente norme s'appliquent toujours, mais il convient de veiller particulièrement à l'incertitude spécifiée et aux procédures d'étalonnage.

Par exemple, les sources de champs qui peuvent être mesurées avec la présente norme sont:

- les dispositifs fonctionnant aux fréquences industrielles (50/60 Hz) et générant des champs de fréquence industrielle et des harmoniques de ces fréquences (exemples: lignes d'énergie, appareils électriques...)
- les dispositifs générant des champs indépendants de la fréquence industrielle. (Exemples: voie de chemin de fer électrifiée (du continu. à 20 kHz), avions de ligne (400 Hz), les appareils de chauffage par induction (jusqu'à 100 kHz) et les véhicules électriques).
- les dispositifs générant des champs magnétiques statiques: imagerie par résonance magnétique (IRM), lignes d'énergie à courant continu, soudage par courant continu, électrolyse, aimants, fours électriques ... Les courants continus sont souvent générés par des convertisseurs, qui créent également des composantes alternatives (harmoniques à fréquence industrielle), qu'il convient d'évaluer.

Si des normes de produit concernant les champs électromagnétiques sont disponibles, il convient de les utiliser.

Eu égard aux mesures de champs électriques, la présente norme considère uniquement la mesure du champ électrique non perturbé en un point de l'espace (c'est-à-dire le champ électrique avant l'introduction du mesureur du champ et de l'opérateur) ou sur des surfaces conductrices.

Les sources d'incertitude pendant les mesures sont également identifiées, et des lignes directrices sont fournies quant à la manière dont il convient de les combiner afin de déterminer l'incertitude de mesure totale.

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).

IEC 61786-1:2013, *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*

ISO/IEC Guide 99:2007, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes et définitions

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

NOTE Tout au long de la présente norme, les expressions "induction magnétique" et "champ magnétique" sont considérées comme étant synonymes.

3.1

niveau moyen d'exposition

moyenne spatiale, sur l'ensemble du corps humain, des champs auxquels un individu est exposé

3.2

facteur de correction

facteur numérique par lequel le résultat non corrigé d'une mesure est multiplié pour compenser une erreur connue

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

3.3

facteur d'élargissement

facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude type composée pour obtenir l'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 % pour cent de la distribution pour un facteur d'élargissement $k = 1, 2$ et 3 , respectivement.

3.4

répétabilité (des mesures)

étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures successives du même mesurande, effectuées dans les mêmes conditions de mesure, c'est-à-dire:

- suivant le même mode opératoire,
- par le même observateur,
- au moyen des mêmes appareils de mesure, utilisés dans les mêmes conditions,
- dans le même laboratoire,
- à des intervalles de temps assez courts.

[SOURCE: IEC 60050-311:2001, 311-06-06, modifiée –La note à l'article a été supprimée.]

3.5

reproductibilité (des mesures)

étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures de la même valeur d'une grandeur, dans le cas où les mesures individuelles sont effectuées en faisant varier les conditions de mesure:

- principe de mesure,
- méthode de mesure,
- observateur,
- appareils de mesure,
- étalon de référence,
- laboratoire,
- dans des conditions d'utilisation des appareils de mesure différentes de celles usuellement employées,
- après des intervalles de temps assez longs par rapport à la durée d'une seule mesure

[SOURCE: IEC 60050-311:2001, 311-06-07, modifiée – Les notes à l'article ont été supprimées.]

3.6

incertitude type

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

3.7

incertitude de mesure

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

Note 1 à l'article: L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages 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 Considérations générales

4.1 Différents objectifs de mesure

4.1.1 Généralités

Les champs magnétiques et électriques peuvent être caractérisés en fonction d'un certain nombre de paramètres, c'est-à-dire l'amplitude, la fréquence, la polarisation, etc. (voir l'IEC 61786-1:2013, Annexe C). La caractérisation d'un ou de plusieurs de ces paramètres, et la manière dont ils peuvent être liés à l'exposition humaine, peut être un objectif possible du

programme de mesures. A cet égard, et pour aider les lecteurs intéressés par le développement d'un protocole de mesure du champ, le présent paragraphe donne une liste des objectifs et méthodes de mesure possibles.

A l'exception des zones proches de sources à haute tension, il n'est pas utile de mesurer le champ électrique à fréquence industrielle, ce champ représentant au maximum quelques dizaines de volts par mètre [3; 22]¹.

L'Annexe A donne des exemples de caractéristiques classiques du champ dans différents environnements.

Les objectifs d'un programme de mesures, tels que ceux considérés ci-dessous, doivent être clairement établis. Une définition claire des objectifs est indispensable à la détermination des exigences en matière d'instrumentation et d'étalonnage (la bande passante de l'instrumentation, la plage d'amplitudes, les points d'étalonnage en fréquence, par exemple). Une fois les objectifs identifiés et l'instrumentation appropriée acquise, il peut s'avérer préférable de procéder à une étude pilote dans l'environnement considéré avant de prendre des décisions quant aux méthodes de mesure définitives et au protocole associé. Le protocole décrit la procédure à suivre pas à pas, en utilisant les méthodes possibles indiquées, afin d'atteindre les objectifs de mesure. Le protocole peut explicitement indiquer les exigences relatives à l'instrumentation (bande passante, dimensions de la sonde, plage d'amplitudes, par exemple), à l'emplacement et à la durée des mesures. Ensuite, il convient qu'il soit possible, à l'aide du même protocole, de comparer en toute confiance les résultats de mesure dans des environnements électriques analogues.

Des objectifs de mesure et des méthodes possibles pour leur réalisation sont donnés en 4.1.2 à 4.1.6.

4.1.2 Caractérisation des niveaux de champ pour la conformité aux normes de sécurité

Les limites des niveaux de champ électrique ou magnétique admis exprimées sous la forme de valeurs résultantes et en fonction de la fréquence ont été indiquées dans un certain nombre de documents comme par exemple dans [17-19; 21][18-20; 22] nécessitant de déterminer les niveaux de champ avec la valeur maximale ou la valeur spatiale dans les zones spécifiées. Les points de mesure doivent être choisis en tenant compte de l'emplacement possible des personnes.

Méthode: Des mesureurs triaxiaux doivent être utilisés pour mesurer les champs magnétiques et électriques résultants. Il existe des normes et des lignes directrices pour de telles mesures à proximité de lignes d'énergie [4; 9; 15] et d'appareils électriques [10] .

Il convient de mettre en corrélation les mesures des champs magnétiques à proximité de lignes d'énergie avec les courants de charge. Les courants de charge des appareils sont constants ou, en règle générale, périodiques dans une plage fixe sur une durée assez courte, ce qui permet de déterminer le champ magnétique résultant le plus important avec assez peu de mesures.

4.1.3 Caractérisation des variations spatiales

Les champs magnétiques et électriques ne sont pas constants autour des sources. Par exemple, les variations de champ magnétique ou électrique sous les lignes d'énergie sont classiques (Figure 1 et Figure 2) et peuvent être calculées.

Dans la Figure 1, la non-uniformité est définie par [4; 9;] comme étant la valeur maximale de

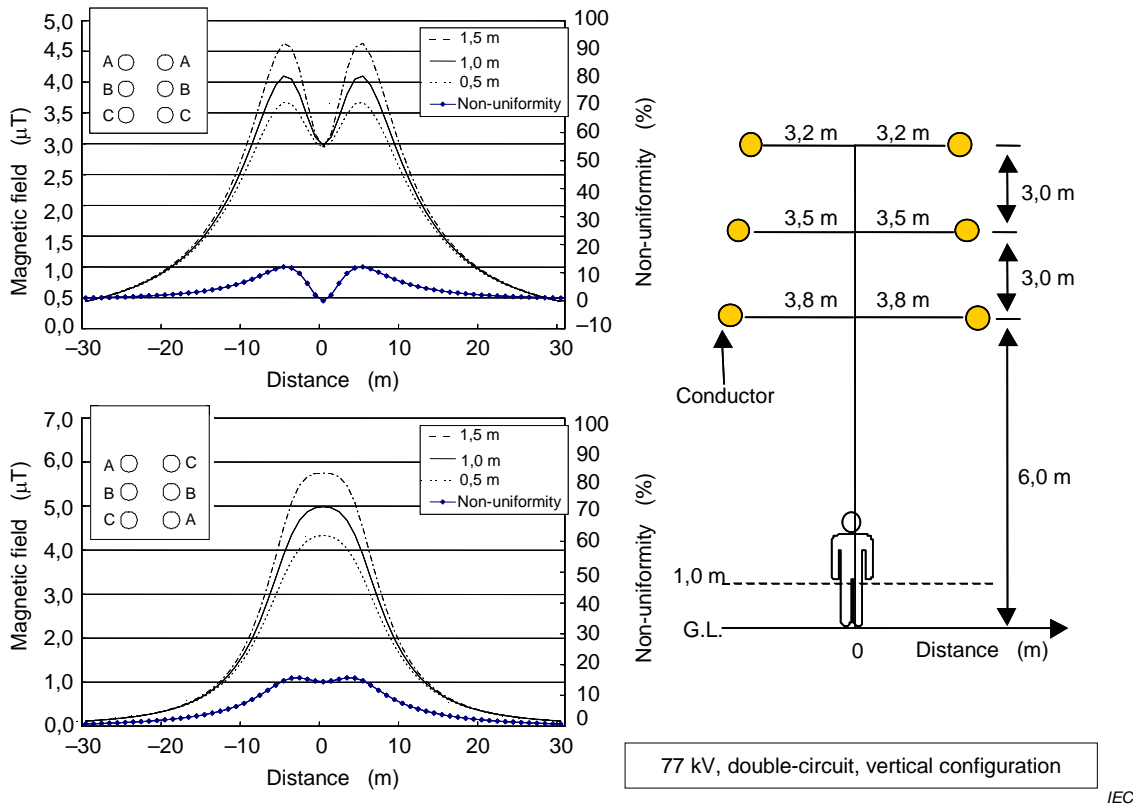
¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

$$\left(\frac{|B_h - B_{avg}|}{B_{avg}} \right) \times 100 (\%)$$

où

B_h est le niveau de champ magnétique à 0,5 m, 1,0 m et 1,5 m au-dessus du sol;

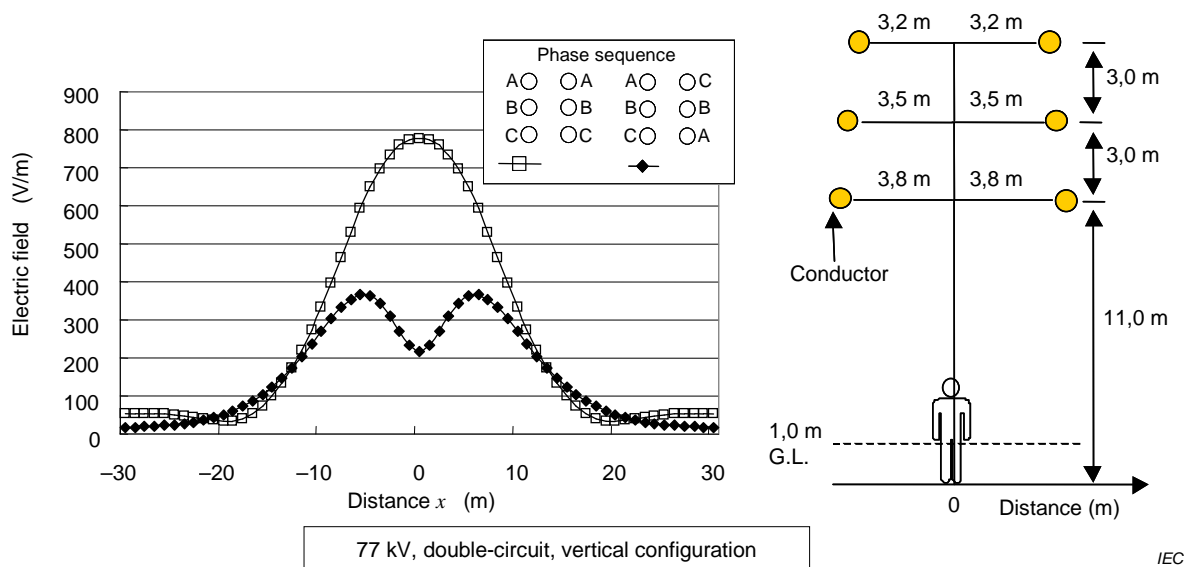
B_{avg} est la moyenne arithmétique des trois niveaux.



Légende

Anglais	Français
Magnetic field (μT)	Champ magnétique (μT)
Non-uniformity	Non-uniformité
Distance (m)	Distance (m)
Conductor	Conducteur
77 kV, double-circuit, vertical configuration	77 kV, deux circuits, configuration verticale

Figure 1 – Niveaux de champ magnétique sous une ligne aérienne de transport de 77 kV (de [9])



Légende

Anglais	Français
Electric field (V/m)	Champ électrique (V/m)
Phase sequence	Séquence de phase
Distance x (m)	Distance x (m)
Distance (m)	Distance (m)
Conductor	Conducteur
77 kV, double-circuit, vertical configuration	77 kV, deux circuits, configuration verticale

Figure 2 – Niveaux de champ électrique sous une ligne aérienne de transport (de [9])

En règle générale, la répartition spatiale des champs magnétiques loin des lignes d'énergie ou de sources uniques identifiables n'est pas connue.

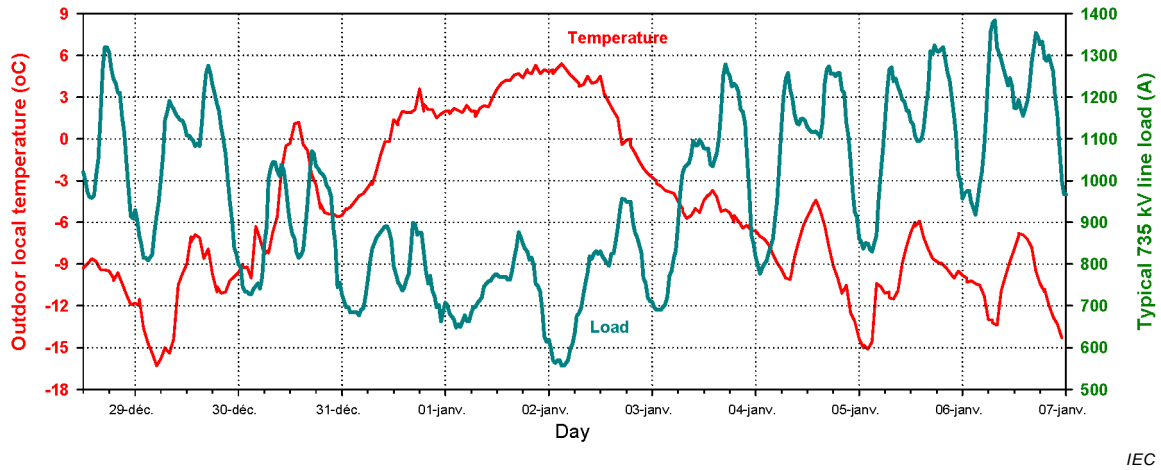
Dans la plupart des environnements, les champs magnétiques alternatifs ne sont pas uniformes en raison de la dépendance spatiale des champs vis-à-vis courants des sources. Il convient de noter que les champs magnétiques statiques présentent une variabilité spatiale considérable dans les habitations [29].

Méthode: Les composantes de champ magnétique doivent être enregistrées en fonction de la coordonnée de position lors de la caractérisation de la variation spatiale. Il existe des normes pour réaliser ces mesures à proximité de lignes d'énergie [4; 9; 15] et d'appareils électriques [9]. Même si ces mesures peuvent être réalisées avec des mesureurs de contrôle, l'instrumentation intégrant des "roues de mesure" permet de caractériser les répartitions spatiales des champs magnétiques dans des environnements dont les obstructions physiques ne gênent pas le mouvement de la roue. Au fur et à mesure de sa rotation, la roue déclenche périodiquement un mesureur de champ magnétique triaxial pour enregistrer le champ magnétique résultant. Les logiciels qui accompagnent l'instrumentation permettent de tracer les profils de champ magnétique, des contours d'isovaleurs, des analyses statistiques des niveaux de champ, etc. [2; 26]. De même que pour la caractérisation des niveaux de champ pour la conformité aux normes de sécurité, ces données ne tiennent pas compte des variations dans le temps des profils de champ sans mesures répétées.

4.1.4 Caractérisation des variations dans le temps

Les champs magnétiques étant générés par des courants de charge et des courants de retour à la terre qui peuvent sensiblement varier dans le temps, les variations dans le temps des champs magnétiques peuvent aisément dépasser un facteur de 2.

Sous une ligne d'énergie, le champ magnétique dépend de la charge de la ligne. Pour les lignes simples ou les lignes doubles fonctionnant en parallèle, le champ magnétique est directement proportionnel à la charge de la ligne. La Figure 3 donne un exemple de la charge d'une ligne de 735 kV et de la température extérieure. Dans ce cas, la charge est influencée par les activités humaines (cycle quotidien), la température extérieure (cycle saisonnier) et la place de la ligne dans le réseau. De plus, le niveau de champ magnétique peut varier selon la flèche des conducteurs, en raison l'échauffement du à d'importantes charges de courant et aux conditions environnementales [16] .



IEC

Légende

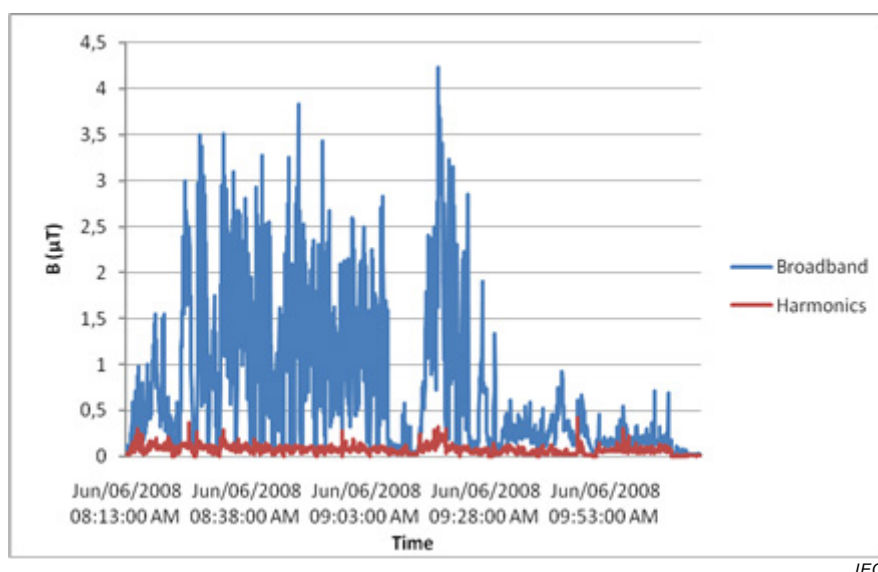
Anglais	Français
Temperature	Température
Outdoor local temperature (°C)	Température locale extérieure (°C)
Typical 735 kV line load (A)	Charge classique d'une ligne de 735 kV (A)
Load	Charge
Day	Jour

Figure 3 – Exemple de variation de charge d'une ligne de 735 kV due aux activités humaines (quotidienne) et à la température extérieure (saisonnière)

Méthode: Les mesureurs de champ magnétique triaxiaux ou monoaxiaux sont dotés de connexions de sortie qui peuvent être utilisées conjointement avec des enregistreurs de données disponibles dans le commerce pour enregistrer la variation des niveaux de champ magnétique en un ou plusieurs endroits, en fonction du temps. Des exposimètres triaxiaux et des instruments de capture de la forme d'onde du champ magnétique peuvent également être utilisés pour enregistrer régulièrement ces niveaux de champ. Compte tenu de la dépendance des niveaux de champ magnétique selon les courants de charge, qui peuvent varier de manière quotidienne, hebdomadaire, saisonnière (Figure 3), etc., le défi consiste à déterminer un intervalle de temps pour l'enregistrement des mesures qui va permettre de capturer suffisamment de variations du champ pour obtenir une description statistique valide. Il peut s'avérer utile de mener une étude pilote initiale dans l'environnement de mesure considéré pour résoudre la question du temps d'échantillonnage de mesure.

Trouver la valeur temporelle maximale du champ magnétique n'est pas opération aisée. Dans certaines situations simples (sous des lignes d'énergie à circuit unique, par exemple), cette valeur peut être estimée en enregistrant le courant lors de la mesure du champ magnétique et en l'extrapolant à la charge maximale.

Il convient également de considérer les mesures réalisées dans des systèmes électriques de transport en commun ou d'autres domaines faisant appel à des moteurs à vitesse variable. Par exemple, dans les trains, le champ magnétique peut être fonction de la vitesse du train (voir Figure 4).



IEC

Légende

Anglais	Français
Broadband	Large bande
Harmonics	Harmoniques
Time	Temps

NOTE Bande large = 40 Hz – 800 Hz, harmoniques = 100 Hz – 800 Hz.

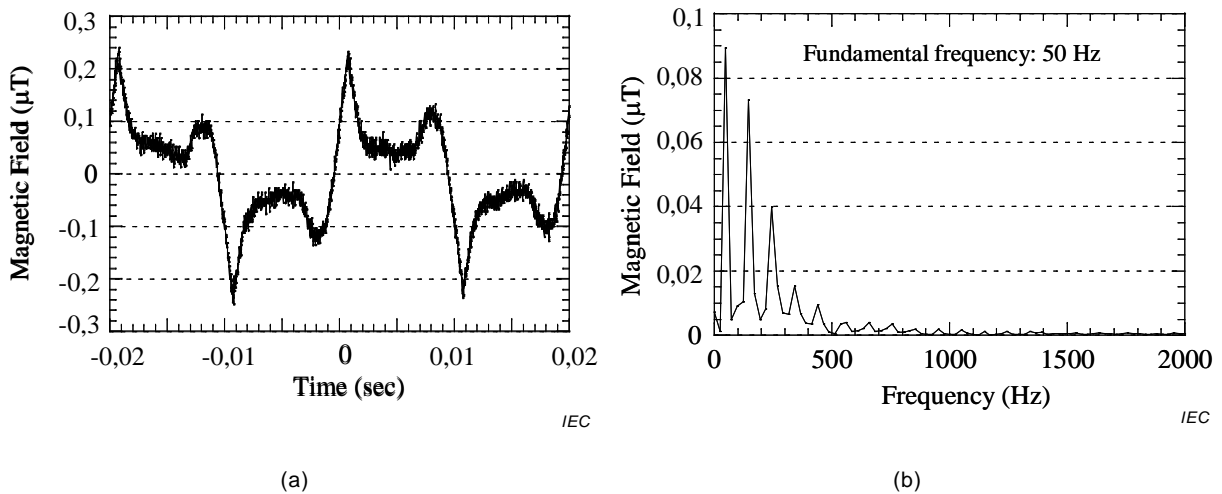
Figure 4 – Champ magnétique 50 Hz dans un TGV en France

Pour les champs électriques, à l'inverse des mesures isolées des champs magnétiques générés par des lignes d'énergie, les valeurs mesurées ne changent pas énormément, car les tensions restent pratiquement constantes. Toutefois, le champ électrique peut varier selon la flèche des conducteurs en raison de l'échauffement du à d'importantes charges de courant [16].

4.1.5 Caractérisation du contenu fréquentiel du champ magnétique ou du champ électrique

Étant donné que (1) les champs électriques et magnétiques générés par les équipements électriques contiennent souvent des harmoniques aux fréquences industrielles ou des fréquences sans relation avec la fréquence industrielle, et que (2) les limites de champ électrique et magnétique ont été définies en fonction de la fréquence [17-19; 21], la caractérisation du contenu fréquentiel peut être un objectif important.

Un exemple de champ magnétique riche en harmoniques et généré par un appareil électrique commun est présenté à la Figure 5. La Figure 5a présente une forme d'onde de la composante horizontale du champ magnétique à 10 cm de la surface de la partie avant centrale d'un téléviseur LCD à écran plat 66,04 cm (26 pouces). Les composantes harmoniques du champ sont indiquées à la Figure 5b, qui présente un spectre de fréquence pour la forme d'onde de la Figure 5a. Elle montre que la fréquence fondamentale est de 50 Hz et que des niveaux significatifs des 3^{èmes} et 5^{èmes} harmoniques sont inclus.



Légende

Anglais	Français
Magnetic field (μT)	Champ magnétique (μT)
Time (sec)	Temps (sec)
Fundamental frequency: 50Hz	Fréquence fondamentale: 50Hz
Frequency (Hz)	Fréquence (Hz)

Figure 5 – Forme d'onde (a) et spectre de fréquence (b) du champ magnétique générés par un téléviseur LCD à écran plat de 66,04 cm (26 pouces)

Méthode: Les mesureurs de champ magnétique monoaxiaux et triaxiaux disponibles dans le commerce sont parfois dotés de connexions de sortie donnant une tension de sortie proportionnelle au champ magnétique.

Ces instruments, combinés aux analyseurs de spectre disponibles dans le commerce, peuvent être utilisés pour caractériser les composantes de fréquence dans le champ magnétique. D'autre part, les instruments de capture d'onde sont équipés de logiciels permettant de déterminer le contenu fréquentiel à partir des données enregistrées. Des mesureurs de champ magnétique qui peuvent être commutés pour indiquer les valeurs efficaces de la fréquence industrielle et une ou plusieurs fréquences harmoniques sont également disponibles. Des mesureurs de champ électrique et magnétique plus modernes contiennent un analyseur de spectre.

Il convient de noter que le contenu fréquentiel des champs magnétiques générés par les équipements électriques à vitesse variable (les systèmes électriques de transport en commun, par exemple) peut changer en fonction de la vitesse [5].

Le champ électrique généré par les réseaux d'énergie électrique a un faible taux de distorsion harmonique. Donc, les harmoniques des champs électriques à fréquence industrielle sont négligeables [9].

4.1.6 Caractérisation de l'exposition des personnes au champ magnétique et définition de la mesure

Un certain nombre d'études épidémiologiques relatives à l'exposition professionnelle ou domestique et ayant examiné les effets sur la santé d'une exposition à des champs magnétiques à fréquences industrielles, ont été menées. A partir des mesures de champ magnétique, différents indicateurs statistiques peuvent être définis

Méthode: Une évaluation plus précise de l'exposition est déterminée grâce à un petit exposimètre triaxial qui enregistre périodiquement le champ à un emplacement d'intérêt sur le corps.

L'exposition humaine doit être estimée à partir d'une combinaison de mesures de variation spatiale et temporelle et d'informations décrivant les modèles d'activité humaine [31].

Des exposimètres triaxiaux disponibles dans le commerce pouvant être portés sur le corps peuvent être utilisés. Ces instruments enregistrent périodiquement la valeur de champ magnétique résultante sur des périodes pouvant aller jusqu'à plusieurs jours, selon la fréquence d'échantillonnage du champ magnétique, la capacité de stockage de la mémoire et la durée de vie de la batterie. La fréquence d'échantillonnage dépend en partie du modèle d'interaction supposé entre le champ et le sujet. Les données collectées peuvent être téléchargées sur un ordinateur et le logiciel qui accompagne l'instrument, ou spécialement développé, permet de déterminer l'exposition en fonction de paramètres tels que la moyenne pondérée dans le temps (TWA), la moyenne géométrique et plusieurs valeurs en centile.

Il convient d'estimer les expositions humaines passées dans les zones spécifiées grâce à des exposimètres portatifs de remplacement exécutant des activités menées par le passé dans les zones spécifiées [27-28; 30]. Cette approche suppose que les sources de champ magnétique n'ont pas changé de manière significative au fil du temps.

4.2 Sources à plusieurs fréquences

4.2.1 Généralités

Si une source ne génère pas un champ sinusoïdal unique, le champ généré peut être décrit comme étant une superposition de champs sinusoïdaux avec différentes fréquences. Le spectre du champ peut être composé de composantes spectrales discrètes ou peut être continu. Les lignes de distribution et les convertisseurs alternatif/continu sont des exemples de source générant un spectre discret. Ces exemples présentent également un spectre d'harmonique, ce qui signifie que les composantes spectrales apparaissent uniquement à des multiples entiers d'une fréquence fondamentale. Un spectre discret non harmonique peut être généré par au moins deux générateurs indépendants. Aucune composante spectrale discrète n'est visible dans un spectre continu, ce dernier étant composé d'un nombre infini de lignes spectrales à espacement infiniment petit. Le spectre d'une seule impulsion ou salve est un exemple de spectre continu. De même, le bruit thermique génère un spectre continu. Bien entendu, un spectre discret et un spectre continu peuvent être superposés dans un spectre réel.

Le présent paragraphe 4.2 a pour objet de montrer comment des champs non sinusoïdaux peuvent être comparés aux niveaux de référence indiqués dans les lignes directrices ou les normes.

Dans la plage de fréquences jusqu'à 100 kHz, les lignes directrices s'appuient sur les effets à court terme tels que la stimulation du système nerveux [17-19; 21]. L'autre effet biologique connu est l'effet thermique, qui peut être négligé en dessous de 100 kHz. La référence [25] donne un excellent récapitulatif des documents traitant des effets neurophysiologiques des champs électromagnétiques.

Les lignes directrices définissent les restrictions de base pour caractériser ces effets neurophysiologiques. Ces restrictions de base n'étant pas des grandeurs mesurables, les lignes directrices introduisent des niveaux de référence pour les champs externes. Les restrictions de base et les niveaux de référence dépendent de la fréquence.

Le niveau de référence permet de disposer d'un modèle pratique qui est valide pour les champs sinusoïdaux externes. La réciproque de la courbe de niveau de référence peut être perçue comme une fonction de transfert entre les champs externes et les effets biologiques. Si le spectre du champ externe multiplié par cette fonction de transfert donne une valeur inférieure à un, le champ externe est supposé conforme à la norme de sécurité correspondante.

Le concept de fonction de transfert peut également être appliqué pour les champs non sinusoïdaux. La multiplication du spectre du champ externe par la fonction de transfert donne un spectre pertinent pour l'exposition et qui peut être appelé "spectre pondéré". Pour un spectre discret, cela signifie que l'intensité de champ de chaque composante spectrale est divisée par le niveau de référence à la fréquence de la raie spectrale. La question est à présent de savoir comment ajouter les raies spectrales pondérées. Les méthodes suivantes sont publiées:

4.2.2 Somme des amplitudes pondérées

Les références [19] [21] et [18] proposent d'ajouter les amplitudes des raies spectrales pondérées.

Par exemple, référence [21] propose les critères suivants pour le champ magnétique:

$$\sum_{j=1}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1$$

où

H_j est l'intensité de champ magnétique à la fréquence j

$H_{R,j}$ est le niveau de référence à la fréquence j définie dans référence [21]

Cette méthode surestime habituellement l'exposition, car elle n'utilise pas les informations de phase du spectre.

4.2.3 Valeur de crête pondérée

Un avis de l'ICNIRP [20] a clairement démontré que la méthode de la somme des amplitudes pondérées n'est qu'une estimation du cas pire, parce que la phase des raies spectrales pondérées n'est pas prise en compte. Il est proposé de prendre en compte la phase du spectre source et de transformer le spectre pondéré dans le domaine temporel. La valeur de crête du signal pondéré obtenu dans le domaine temporel est finalement la mesure d'exposition pertinente. La réciproque de la courbe de niveau de référence est utilisée pour l'amplitude de la fonction de transfert. La phase de la fonction de transfert est déduite de la pente de la courbe de niveau de référence.

Une méthode fonctionnant complètement dans le domaine temporel est également proposée dans référence [20]: dans cette méthode, le signal de domaine temporel du champ est convolué avec la réponse impulsionnelle d'un filtre de pondération. La fonction de transfert de ce filtre de pondération est identique à celle déjà décrite pour la méthode du domaine fréquentiel. De nouveau, la valeur de crête du signal pondéré dans le domaine temporel est la mesure d'exposition pertinente.

D'un point de vue mathématique, il n'existe aucune différence entre les deux méthodes proposées, la multiplication dans le domaine fréquentiel étant exactement identique à la convolution dans le domaine temporel. Dans l'Article 8 de l'IEC 62311 [11] la méthode de crête pondérée est également décrite en détail. La méthode de crête pondérée utilisant l'approche de la convolution est déjà disponible dans des instruments de mesure présents sur le marché. Ces instruments fonctionnent en temps réel, sont très faciles à utiliser et peuvent être utilisés pour les signaux arbitraires. Plus particulièrement, des signaux comme des impulsions, des salves ou du bruit peuvent être évalués dans le sens des références [20] et [11].

4.2.4 Séparation d'impulsion

Pour les signaux au comportement temporel arbitraire, une évaluation du signal de domaine temporel est proposée en 5.3.2 de la référence [1]. Elle est décrite en détail pour les champs magnétiques uniquement. Le signal du champ dans le domaine temporel est divisé en une

séquence d'impulsions simples. A partir de la durée de chaque impulsion est calculée une fréquence correspondante, utilisée pour sélectionner le niveau de référence correct pour chaque impulsion. Dans le cas général, la valeur de crête de la dérivée temporelle de chaque impulsion de champ magnétique doit être comparée à la valeur de crête d'un signal sinusoïdal au niveau de référence, multipliée par sa fréquence angulaire correspondante.

Dans de nombreux cas, cette procédure donne les mêmes résultats que la méthode de crête pondérée décrite dans les références [20] et [11] si les mêmes niveaux de référence sont appliqués, si les impulsions sont séparées correctement et si les fréquences correspondantes des impulsions sont correctement extraites. Cette similarité s'explique par le fait que ces méthodes reposent sur les mêmes effets physiques et neurophysiologiques. L'interprétation de ces effets est toutefois différente à certains égards. La séparation du signal de domaine temporel en impulsions uniques et l'extraction des paramètres pertinents ne sont pas des opérations aisées et bien définies. Par conséquent, la reproductibilité de cette méthode n'est pas bonne.

4.2.5 Valeur efficace pondérée

En [10], il est proposé d'ajouter dans un premier temps les carrés des amplitudes des composantes spectrales pondérées, puis de prendre dans un deuxième temps la racine carrée de cette somme comme étant une mesure de l'exposition réelle. Selon le théorème de Parseval, la valeur efficace du signal de domaine temporel pondéré est exactement la même. Dans référence [10], une durée moyenne d'une seconde est proposée pour la méthode du domaine temporel. Cette méthode a été mise en place afin d'éviter toute surestimation inhérente au calcul direct de la somme des amplitudes. De même, dans référence [11], la version de cette méthode dans le domaine fréquentiel est proposée comme étant un moyen d'éviter les surestimations. Toutefois, il n'existe aucune raison neurophysiologique à cette approche. Par conséquent, cette procédure peut sous-estimer la situation réelle.

4.2.6 Raie spectrale pondérée la plus élevée

Dans référence [1], les effets additifs des différentes composantes spectrales eu égard aux effets neurophysiologiques sont supposés absents. Conformément au paragraphe 5.3.3 de référence [1], il apparaît suffisant de montrer la conformité de chaque composante spectrale séparément si le spectre est composé d'un nombre limité d'harmoniques, et si les amplitudes de ces harmoniques diminuent avec la fréquence. Pour connaître les raisons de cette approche, référence [8] est citée dans référence [1]. Il vaut la peine de noter que [8] n'est qu'un résumé. Il vaut également la peine de noter que la méthode décrite dans le paragraphe 5.3.2 de référence [1] peut donner des résultats plus conservatifs.

4.2.7 Conclusion et recommandation

Nous avons vu qu'il existe un large éventail de méthodes permettant d'évaluer les champs avec plusieurs fréquences. Du point de vue actuel, il convient d'utiliser la méthode de crête pondérée, étant donné qu'elle présente le moins de risque de surestimation et de sous-estimation. Elle donne également des résultats stables et prévisibles, pour un minimum de travail pour l'opérateur.

4.3 Considérations avant les mesures

Avant de procéder aux mesures, il est utile d'avoir une idée de la répartition du champ qui doit être mesuré. C'est la raison pour laquelle les informations ci-après sont exigées (dans la mesure du possible):

- identification des sources du champ;
- caractéristiques géométriques de la source;
- charge des sources (définie en termes de courant, de puissance, etc.);
- photos ou cartes permettant de décrire précisément les zones dans lesquelles les mesures vont être réalisées;

- schémas électriques à jour;
- conditions atmosphériques;
- zones accessibles au public ou aux travailleurs;
- présence d'objets métalliques.

NOTE Même si la plupart des sources de champ magnétique sont visibles (éclairage au dessus, appareils électriques, par exemple), d'autres ne le sont pas (équipements électriques dans les pièces adjacentes ou aux étages supérieurs ou inférieurs, par exemple).

Il peut s'avérer nécessaire de mener une étude pilote avant de procéder aux mesures finales. L'étendue de cette étude pilote dépend du contexte. Il peut uniquement s'agir d'une analyse rapide de la zone, afin de rechercher le champ maximal. Il peut s'agir d'une étude plus détaillée visant à prendre des décisions sur le délai entre les mesures, les hauteurs de mesure, la taille d'échantillon, les formats des feuilles de données, les questionnaires de classification des travaux/tâches, etc.

Dans l'étude pilote, il convient de vérifier la présence d'harmoniques. S'il peut être démontré que les harmoniques sont négligeables, en d'autres termes, si la différence d'exposition mesurée avec et sans harmonique est inférieure à 5 %, il n'est pas nécessaire de les mesurer dans l'étude principale.

Il convient également de vérifier la plage de mesures des instruments au cours de l'étude pilote. Certains instruments sont à sélection automatique du calibre: cela peut être plus pratique, par exemple, si les niveaux des champs sont très différents selon les endroits. Il convient de ne pas utiliser la sélection automatique de calibre pour les signaux transitoires.

Si l'objectif de la mesure est une étude épidémiologique, une étude pilote doit être menée dans le cadre du processus de développement d'un protocole de mesure final.

5 Procédures de mesure et précautions

5.1 Champ magnétique alternatif

Lors du développement d'une méthode et d'un protocole de mesure, les sources de champ magnétique suivantes doivent être prises en compte, le cas échéant:

- les sources électriques qui alimentent le dispositif;
- les types et emplacements des transformateurs;
- les emplacements des principaux câbles et disjoncteurs;
- l'amplitude des tensions d'alimentation et des périodes d'utilisation de la puissance de crête;
- les fréquences (y compris 0 Hz) des alimentations et des dispositifs électriques;
- l'emplacement des personnes par rapport aux sources de champ connues;
- l'emplacement des mesures par rapport au corps humain (la tête, le tronc, par exemple);
- la présence de moteurs et de générateurs;
- la présence de petits chauffages;
- la présence de bobines à noyau dans l'air utilisées dans les shunts et circuits bouchons
- systèmes et connexions de mise à la terre.

Les mesures d'induction magnétique doivent être réalisées avec des instruments triaxiaux et doivent être des mesures du champ magnétique résultant,

Des instruments monoaxiaux peuvent être utilisés dans certains cas, par exemple, pour connaître le sens du champ et le champ magnétique maximal ou pour connaître l'orientation

et la forme de l'ellipse du champ magnétique, et lorsque le sens du champ polarisé linéairement est déjà connu.

Certains instruments triaxiaux peuvent également déterminer les paramètres de champ mentionnés ci-dessus.

La taille de la sonde ou des capteurs doit être adaptée à la variation spatiale du champ mesuré. Il convient que la surface des capteurs soit de 0,01 m² ou moins (5.8.2 de l'IEC 61786-1:2013).

La bande passante de l'instrument doit être adaptée au contenu fréquentiel du champ mesuré. Si le champ est tel que la bande passante de l'instrument peut affecter la lecture d'une manière significative (c'est-à-dire lorsque plusieurs fréquences sont présentes dans le champ), la bande passante doit être enregistrée et incluse dans le rapport.

Si le champ magnétique est généré par un système d'alimentation électrique, les fréquences présentes sont en général la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz), plus les quelques premières harmoniques. La bande passante minimale utilisée pour la mesure de ces champs doit être comprise entre la fréquence fondamentale et 800 Hz. Une bande passante plus étroite peut être utilisée uniquement s'il peut être démontré que le contenu harmonique est suffisamment petit pour que le résultat de la mesure soit très peu différent (à proximité des lignes d'énergie, par exemple) ou s'il existe une raison particulière de mesurer une plage de fréquences plus étroite.

Lors de mesure de champs générés par des sources autres que le système d'alimentation électrique, la bande passante doit être choisie de manière appropriée. Les champs générés par certains systèmes de transport présentent une fréquence fondamentale inférieure, alors que les appareils de chauffage à induction, les écrans video, les avions de ligne, les navires et les harmoniques générées par des moteurs à vitesse variable peuvent produire des champs aux fréquences plus élevées.

Si la bande passante est étendue à des fréquences plus basses, des précautions doivent être prises pour éviter les erreurs provoquées par le mouvement des sondes à bobine dans les champs statiques. Ces erreurs peuvent en général être évitées en maintenant la bobine stationnaire ou en sélectionnant une plage de fréquences appropriée.

Les mesures réalisées dans un champ magnétique pratiquement uniforme correspondent à l'exposition de tout le corps humain, si présent à l'emplacement de mesure et au moment des mesures. C'est le cas sous une ligne d'énergie [9].

Il est possible d'utiliser le concept de niveaux moyens d'exposition si la distance entre la source et le corps est supérieure à 20 cm. Pour déterminer les niveaux moyens d'exposition, les champs doivent être mesurés à différentes hauteurs et positions, en tenant compte de la position du corps, et la moyenne des résultats calculée. L'IEC 62110 donne un protocole de mesure de l'exposition du public à un champ magnétique émis par des installations électriques, qui définit 3 hauteurs de mesure [9].

Cette méthode de calcul de la moyenne sur le corps ne doit pas être utilisée si la distance est inférieure à 20 cm.

Le protocole de mesure doit préciser les distances de mesure entre le point de mesure et les sources (ou les murs, les clôtures ou les surfaces). Il convient que cette distance soit par défaut de 20 cm. Certaines normes définissent les distances de mesure dans des cas particuliers (voir Annexe B).

Dans le cadre du processus de développement d'un protocole de mesure visant à déterminer le niveau d'exposition humaine aux champs magnétiques, les objectifs et méthodes de mesure permettant de les atteindre doivent être clairement indiqués. Une définition claire des objectifs est nécessaire pour déterminer les exigences d'instrumentation et d'étalonnage,

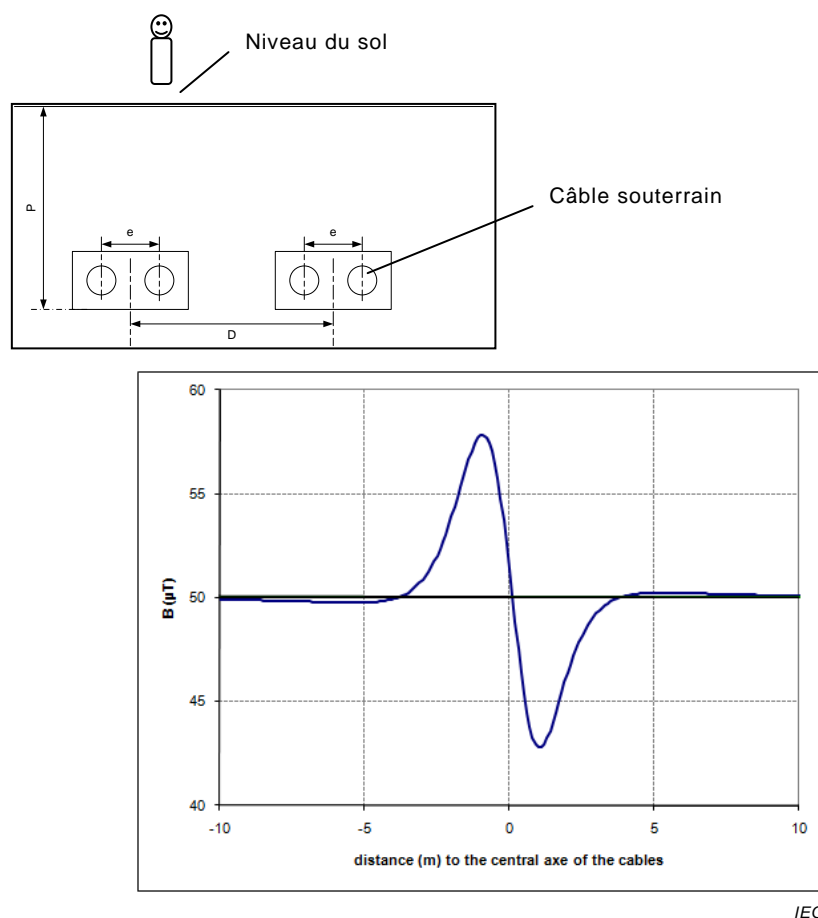
comme par exemple, la bande passante de l'instrumentation, la plage d'amplitudes et les points d'étalonnage de fréquence. Il convient que le protocole de mesure indique le/les paramètre(s) de champ qui doivent être mesurés, l'emplacement où les mesures doivent être réalisées et la manière dont elles doivent l'être. Il est important de noter que, d'une manière générale, un seul protocole de mesure ne sera pas adapté à toutes les situations de mesure.

Le champ magnétique est proportionnel au courant et, à ce titre, peut varier au cours des mesures. Ainsi, cette variation doit être connue afin d'interpréter les résultats. Ceci pourrait être fait en enregistrant le courant dans la charge ou en enregistrant le champ magnétique à un endroit fixe pendant les mesures.

5.2 Champ magnétique statique

La principale différence entre la mesure du champ magnétique alternatif et celle du champ magnétique statique est l'influence du champ magnétique terrestre.

Dans le cas des réseaux électriques à courant continu, il convient de déduire le protocole de l'IEC 62110. Si la ligne à courant continu est souterraine, il convient de considérer le champ statique à l'emplacement du corps comme étant uniforme (au sens de l'IEC 62110), de sorte qu'il convienne qu'une mesure réalisée à 1 m de haut soit suffisante. L'uniformité du champ peut être évaluée a priori par calcul (Figure 6).



IEC

$P = 1,4 \text{ m}$ $D = 1,05 \text{ m}$ $e = 35 \text{ cm}$ $I = 926 \text{ A}$

Polarités de I dans chaque câble = + - - +

Le champ géomagnétique est de $50 \mu\text{T}$ avec un angle de 60° vers le bas et aligné avec les câbles

Figure 6 – Exemple de profil de champ magnétique statique au-dessus d'un câble souterrain à courant continu (calculé à 1 m de haut)

Le champ magnétique terrestre doit être mesuré au début et à la fin des mesures, de chaque côté du câble. Le champ magnétique terrestre et le champ statique émis par les câbles étant vectoriels, la composante du champ géomagnétique ne peut pas être soustraite simplement. La mesure du champ magnétique doit être reportée telle quelle. La composante géomagnétique doit également être reportée.

5.3 Champ électrique alternatif

Les mesures du champ non perturbé doivent être réalisées avec des instruments triaxiaux et doivent être des mesures du champ électrique résultant.

Des instruments monoaxiaux peuvent être utilisés dans certains cas, par exemple lorsque la direction du champ est déjà connue.

La bande passante de l'instrument doit être adaptée au contenu fréquentiel du champ mesuré. Si le champ est tel que la bande passante de l'instrument peut affecter la lecture d'une manière significative (c'est-à-dire lorsque plusieurs fréquences sont présentes dans le champ), la bande passante doit être enregistrée et incluse dans le rapport.

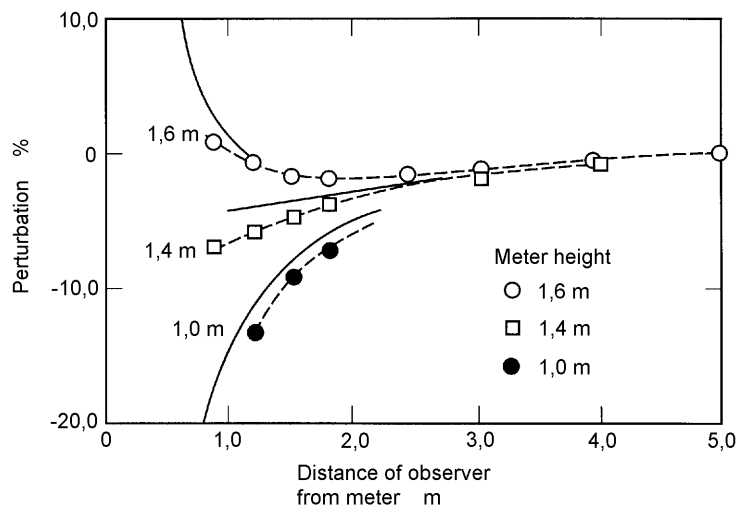
Si des champs électriques sont générés par des réseaux d'énergie, c'est-à-dire des lignes d'énergie, des transformateurs, etc. la fréquence prédominante est la fréquence industrielle

50 Hz ou 60 Hz. Un instrument à bande passante étroite à peu près centrée sur la fréquence industrielle est adapté dans de tels cas pour mesurer la valeur efficace du champ électrique.

Lors de la mesure de champs électriques à partir d'autres sources (des avions de ligne, des navires et certains trains électriques, par exemple), la fréquence fondamentale peut différer de manière significative de 50 Hz/60 Hz, la bande passante devant être choisie de manière appropriée.

Lors des mesures du champ électrique, il convient de veiller particulièrement à éviter les effets de proximité de l'observateur et d'autres personnes pouvant se trouver au voisinage de la sonde de champ. Une perturbation significative du champ peut se produire, capable d'introduire des erreurs inacceptables dans la mesure.

La Figure 7 présente la perturbation de la mesure du champ électrique, en pourcentage, en fonction de la distance de l'observateur par rapport à la sonde et de la hauteur du mesureur de champ au-dessus du sol [7]. Les points de données représentent les perturbations mesurées sous une ligne aérienne de transport de 500 kV par un observateur de 1,80 m (bras le long du corps). Les effets de proximité sont présentés pour les trois hauteurs du mesureur au-dessus du plan de masse. Les courbes tracées en continu sont des prévisions théoriques. Le potentiel de l'observateur étant souvent proche du potentiel de terre en raison de la résistance de fuite et de la capacité par rapport à la terre, les effets de proximité de la Figure 7 peuvent être considérés comme étant classiques.



IEC

Légende

Anglais	Français
Perturbation %	% de perturbation
Meter height	Hauteur du mesureur
Distance of observer from meter m	Distance entre l'observateur et le mesureur, m

Figure7 – Effets de proximité de l'observateur pendant les mesures de champs électriques dans un champ électrique vertical

Les effets de proximité de l'observateur pour les mesureurs d'espace libre dans d'autres géométries, qui peuvent être supérieurs ou inférieurs à ceux présentés à la Figure 7, peuvent être déterminés de manière expérimentale. L'effet de proximité peut être déterminé en notant les changements de valeur de champ en fonction de la distance de l'observateur par rapport au centre de la sonde.

Ainsi, une distance minimale de 2 m doit être respectée entre l'opérateur et la sonde [4].

Les champs électriques peuvent être très facilement perturbés par la présence d'objets conducteurs, même si ces objets sont de mauvais conducteurs électriques (arbres, clôtures, végétation, bâtiments... etc.) [4] Dans la mesure du possible, il convient de retirer tous les objets mobiles. Sinon, il convient que la distance entre la sonde et l'objet soit égale à au moins trois fois la hauteur de l'objet (s'il n'est pas permanent) ou à 1 m (objet permanent), si possible. Les objets qui ne peuvent pas être retirés doivent figurer dans une liste, en indiquant leurs dimensions et leur emplacement [4].

La sonde doit être placée sur un trépied isolant (voir 5.8.4 de l'IEC 61786-1:2013).

Les mesures de champ électrique peuvent être erronées si l'humidité relative est supérieure à 70 % (voir 5.5 de l'IEC 61786-1:2013).

Il convient de reconnaître que les mesures réalisées dans un champ électrique pratiquement uniforme correspondent à une exposition de tout le corps humain, si présent à l'emplacement de mesure et au moment des mesures. L'interprétation des mesures réalisées dans des champs non uniformes est plus restrictive lorsqu'il s'agit de déterminer l'exposition humaine, c'est-à-dire que, la mesure du champ représente uniquement l'exposition de la partie de l'anatomie humaine qui coïnciderait avec l'emplacement de mesure.

Dans le cadre du processus de développement d'un protocole de mesure visant à déterminer le niveau d'exposition humaine aux champs électriques, les objectifs et méthodes de mesure permettant de les atteindre doivent être clairement indiqués. Une définition claire des objectifs est nécessaire pour déterminer les exigences d'instrumentation et d'étalonnage, comme par exemple, la bande passante de l'instrumentation, la plage d'amplitudes et les points d'étalonnage de fréquence. Le protocole de mesure doit indiquer le/les paramètre(s) de champ qu'il convient de mesurer, l'emplacement où les mesures doivent être réalisées et la manière dont elles doivent l'être. Il est important de noter que, d'une manière générale, un seul protocole de mesure ne sera pas adapté à toutes les situations de mesure.

6 Incertitude de mesure

L'incertitude de mesure doit être évaluée conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3. Cette norme requiert que l'écart-type associé à chaque grandeur ayant une influence sur la mesure doit être déterminé, sur la base de mesures réalisées (type A) ou de l'expérience (type B).

Il convient de prendre des décisions quant à l'incertitude totale admise lors des mesures (les exigences d'incertitude concernant l'instrumentation sont données dans l'Article 5 de l'IEC 61786-1:2013).

Pour déterminer l'incertitude totale associée aux mesures efficaces du champ électrique ou magnétique dans différents environnements de mesure, il convient de prendre en compte de manière appropriée les différentes sources d'incertitude. Les sources d'incertitude possibles identifiées dans l'Article 6 de l'IEC 61786-1:2013 et dans l'Annexe C sont les suivantes:

- **Type d'incertitude A**
 - incertitude d'étalonnage;
 - répétabilité de la mesure;
 - reproductibilité de la mesure;
- **Type d'incertitude B**
 - facteur de correction;
 - effets de moyennage des sondes à bobine lors de mesures de champ non uniforme;
 - erreurs de positionnement de la sonde dans les champs non uniformes;
 - réponse en fréquence ou limitations de bande passante (choix du filtre);

- constante de temps de mesure de l'instrument;
- dérive métrologique;
- résolution;
- température;
- proximité d'objets ou d'obstacles;
- humidité (uniquement pour les champs électriques);
- hystérésis de l'échelle en mode sélection automatique du calibre.

Certaines sources d'incertitude peuvent être réduites à des niveaux négligeables. Par exemple, des supports fabriqués dans des matériaux isolants peuvent être utilisés pour positionner précisément la sonde du mesureur de champ.

Il convient d'appliquer les facteurs de correction connus aux mesures obtenues lorsque c'est possible.

Cela peut s'avérer complexe à cause du fait que les facteurs de correction sont définis pour chaque axe.

De même, il convient de reconnaître que les incertitudes de mesure des champs électriques ou magnétiques émis par des appareils ou des équipements électriques, en fonction de la distance à la source, peuvent devenir très importantes (plus de 100 %, par exemple) au fur et à mesure que le niveau de champ émis par la source s'approche du niveau du bruit de fond.

L'écart-type combiné u_c doit être obtenu par la racine carrée de la somme des variances (c'est-à-dire la racine carrée de la somme des carrés des écarts-types):

$$u_c = \sqrt{\sum_1^m c_i^2 \cdot u_i^2}$$

Où c_i est le coefficient de sensibilité et u_i l'incertitude type

L'incertitude (totale) étendue u_e doit être égale à k fois l'écart-type combiné, où k est le facteur d'élargissement.

Le facteur d'élargissement doit être de 2, ce qui, pour les distributions gaussiennes normales, correspond à un intervalle de confiance d'environ 95 %.

$$u_e = 2u_c$$

L'Annexe D donne un exemple d'évaluation de l'incertitude de mesure.

7 Rapport de mesure

Les informations exigées lors de l'enregistrement et du rapport des résultats des mesures peuvent varier selon les objectifs des mesures. Les objectifs de mesure doivent être clairement indiqués au début. Les informations suivantes relatives à l'instrumentation et aux mesures doivent également être fournies, selon le cas:

- description de la procédure de mesure
- le nom du fabricant;
- identification du modèle d'instrument et de la sonde;

- largeur de bande passante de l'instrument;
- date du dernier étalonnage/essai de vérification;
- date des mesures;
- heure des mesures;
- identification du personnel qui a procédé aux mesures;
- conditions météorologiques;
- humidité (pour le champ électrique uniquement);
- description de la source (fréquence et caractéristiques du signal, par exemple);
- conditions de la source, c'est-à-dire le courant de charge;
- résolution en fréquence des spectres des champs contenant plusieurs fréquences;
- indication claire de la grandeur du champ rapportée, par exemple le champ maximal, le champ résultant, la composante verticale du champ, la moyenne pondérée (TWA), la valeur efficace, etc. (il convient d'utiliser des unités SI. Les unités habituelles peuvent être indiquées entre parenthèses);
- description de l'activité humaine si les données d'exposition humaine sont présentées;
- schémas présentant la zone et les emplacements où les mesures ont été réalisées, avec des photos si possible;
- emplacement du point de mesure de référence, avec ses coordonnées GPS si possible;
- champ magnétique terrestre lors de la mesure du champ magnétique statique;
- informations statistiques, par exemple, les plus grandes et plus petites valeurs de champ, la médiane, la moyenne géométrique, etc.;
- l'incertitude de mesure totale;
- conclusion quant aux objectifs de la mesure;
- distance à la source.

Annexe A (informative)

Exemples de caractéristiques des champs dans des environnements classiques

La connaissance des caractéristiques du champ permet de faire le bon choix en matière d'instrumentation et de procédure de mesure. En règle générale, les travailleurs ont accès à des environnements dans lesquels les intensités de champ électrique et magnétique peuvent être supérieures à celles des environnements accessibles au public. Dans la plupart des cas, les deux environnements sont naturellement délimités par des frontières physiques. Par exemple, dans les postes ou enceintes d'installations à moyenne tension, il existe des zones dont l'accès est limité aux travailleurs.

En général, le public est exposé à des champs plus élevés lorsqu'il se trouve à proximité des lignes d'énergie que lorsqu'il en est éloigné.

La conception des équipements à haute tension et forts courants est optimisée afin de réduire le champ généré par des installations électriques.

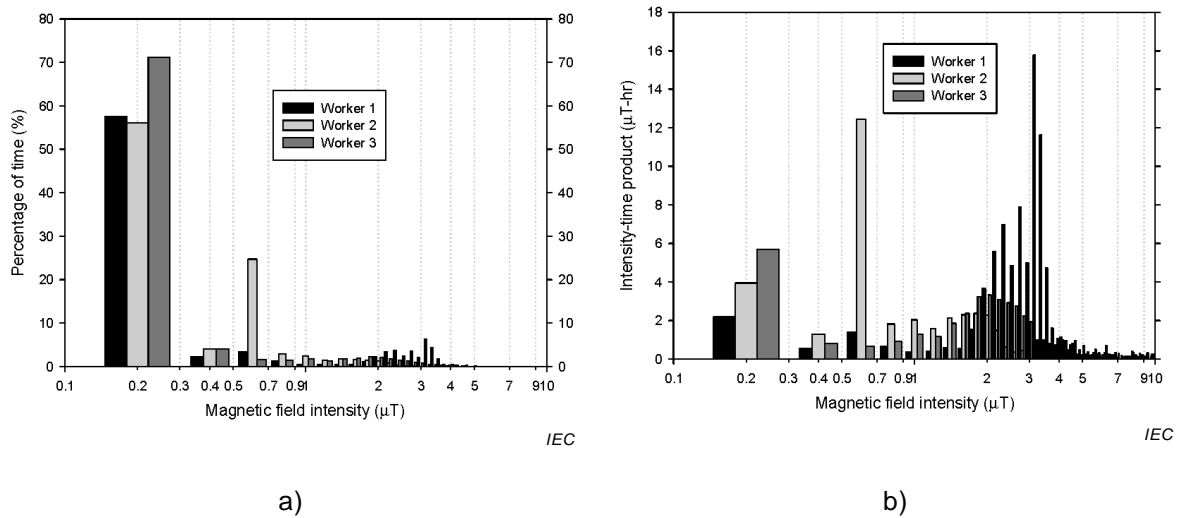
Compte tenu de la nature de leur travail (l'inspection ou la maintenance d'une ligne sous tension, par exemple), les travailleurs peuvent avoir accès à des zones présentant des niveaux de champ plus élevés. Les intensités de champ sont relativement élevées au niveau du sol dans les postes sous les jeux de barres, à proximité des connexions d'alternateur dans les centrales électriques et à proximité des conducteurs de phase des lignes aériennes lors de la maintenance de ligne sous tension. D'autres exemples de source de champ magnétique élevé au travail incluent les machines à souder, l'électrolyse, le chauffage par induction, etc.

L'ordre de grandeur du champ à fréquence industrielle dans les zones accessibles aux travailleurs et au public dans les postes d'une compagnie d'électricité nord-américaine, et pour le droit de passage des lignes d'énergie est récapitulé dans le Tableau A.1.

**Tableau A.1 – Exemple de caractéristiques du champ à l'intérieur
(environnements de travail) et à l'extérieur (environnement public)
de postes électriques dans une compagnie nord-américaine**

Champ électrique		Champ magnétique		
<i>Zone accessible aux travailleurs</i>	<i>Zone accessible au public</i>	<i>Zone accessible aux travailleurs</i>	<i>Zone accessible au public</i>	
Valeur maximale à 2 m au-dessus du sol sous le jeu de barres dans le poste 13,6 kV/m ou plus	Valeur maximale entre 1 m et 10 m des clôtures du poste, environ 1 kV/m	1 000 µT aux alentours de l'inductance de blocage	4 µT à l'extérieur de la clôture du poste	Différentes zones d'un poste 735 kV
Valeur maximale à 1 m au-dessus du sol 10 kV/m		Valeur maximale à 1 m au-dessus du sol 30 µT		Sous la ligne d'énergie
La valeur calculée du champ électrique peut atteindre 80 kV/m sur le lieu de travail, où les travailleurs doivent porter un vêtement conducteur pour réduire le champ électrique au niveau du corps.		La valeur calculée peut atteindre une charge de 150 µT par kA de charge dans un faisceau de 4 sous-conducteurs (une intervention proche peut uniquement être prévue avec un rouleau d'élinde sur le faisceau, la charge de courant est divisée entre les sous-conducteurs du faisceau)		Maintenance de la ligne sous tension au niveau du conducteur de phase

Les statistiques de l'exposition au champ magnétique de 3 travailleurs dans une centrale électrique sont présentées à la Figure A.1. Elle illustre le pourcentage de temps d'exposition (Figure A.1a) et le produit intensité-temps (Figure A.1b) du champ magnétique pendant 3 jours de travail. Cet exemple ne couvre pas toutes les expositions possibles d'un travailleur dans une centrale.



Légende

Anglais	Français
Percentage of time (%)	Pourcentage de temps (%)
Worker 1	Travailleur 1
Worker 2	Travailleur 2
Worker 3	Travailleur 3
Magnetic field intensity (μT)	Intensité du champ magnétique (μT)
Intensity-time product (μT-hr)	Produit intensité-temps (μT-hr)

Figure A.1 – Exposition au champ magnétique d'un travailleur (électricien) dans une centrale électrique nord-américaine (enregistrements sur 3 jours)

Les systèmes de transport en commun peuvent générer un champ à une fréquence supérieure à la fréquence industrielle. Ces caractéristiques de champ pour l'exposition du public sont présentées au Tableau A.2 [6]. Dans ces systèmes, le champ peut varier pendant l'accélération et la décélération du véhicule.

Tableau A.2– Caractéristiques du champ (μT) dans différents systèmes de transport en commun différent aux États-Unis: valeur moyenne et (valeur maximale)

Système de transport	"Statique" < 5 Hz	Extrêmement basses fréquences 5 Hz à 3 000 Hz	Extrêmement basses fréquences basses 5 Hz à 55 Hz	Fréquence industrielle 60 Hz	Harmoniques de puissance 65 Hz à 300 Hz	Extrêmement basses fréquences hautes 305 Hz à 3 000 Hz
Ferry	51,1 (76,0)	0,06 (0,33)	0,02 (0,10)	0,04 (0,31)	0,02 (0,12)	0,01 (0,03)
Escalier roulant	55,7 (95,8)	0,15 (6,14)	0,13 (6,01)	0,04 (0,32)	0,02 (1,05)	0,01 (0,03)
Trottoir roulant	57,6 (121,8)	0,37 (20,0)	0,31 (19,54)	0,12 (1,24)	0,07 (3,72)	0,03 (1,90)
Voitures classiques et véhicules utilitaires légers	32,1 (96,8)	0,57 (12,45)	0,55 (12,45)	0,09 (1,94)	0,08 (1,36)	0,04 (0,78)
Voitures électriques et véhicules utilitaires légers						
Dynamomètre	40,8	0,57	0,34	0,09	0,36	0,1
Piste d'essai	(128,6)	(8,08)	(5,61)	(1,25)	(7,99)	(0,86)
	38,8 (104,1)	0,57 (9,35)	0,48 (9,27)	0,08 (1,53)	0,19 (2,45)	0,07 (0,69)
Avion à réaction	55,2 (66,9)	1,35 (21,25)	0,06 (0,35)	0,00 (0,06)	0,02 (0,81)	1,35 21,24
Navette tram way(courant alternatif)	47,0 (83,5)	1,37 (9,04)	1,07 (8,85)	0,55 (2,90)	0,30 (1,44)	0,12 (0,70)
Bus classique	40,1 (112,4)	1,68 (14,57)	1,64 (14,42)	0,09 (1,42)	0,19 (2,13)	0,21 (2,48)
Bus-navette électrique	38,1 (80,8)	2,04 (48,78)	1,47 (48,67)	0,08 (3,88)	0,89 (22,05)	0,16 (1,07)
Train de banlieue	53,8 (196,9)	4,96 (79,93)	1,85 (45,35)	3,42 (73,88)	1,46 (34,03)	0,59 (4,87)

Selon l'environnement, le champ électrique ou magnétique peut ne pas être uniforme. Par exemple, l'IEC 62110 [9] explique que, dans un environnement public, le champ sous une ligne d'énergie peut être considéré comme étant uniforme, alors que le champ au-dessus d'une ligne souterraine ne l'est pas.

Annexe B (informative)

Exemples de distances de mesure

B.1 IEC 62110:2009 [9]

h est la hauteur de mesure et d est distance à la source.

- Un seul point: $h = 1$ m
- Trois points: $h = 0,5$ m – 1 m – 1,5 m et $d = 0,2$ m
- Cinq points: $h = 0,2$ m et $d = 0,5$ m du centre
- Autour des postes avec lignes aériennes connectées au poste: $h = 1$ m et $d = 0,2$ m

B.2 IEC 62233:2005 [10]

- Appareils utilisés en contact avec des parties du corps: 0 cm
- Autre: 30 cm
- Cas particuliers: Sauna facial, sèche-cheveux, chauffages de lit d'eau: 10 cm
- Tables de cuisson à induction et plaques chauffantes: $d = 30$ cm, hauteur h comprise entre 1 m au-dessus de la zone de cuisson et 0,5 m en dessous.

B.3 IEC 62311:2007 [11]

Distance (entre la source et l'utilisateur) : la distance utilisée pour l'évaluation doit être spécifiée par le fabricant et correspondre à l'usage prévu de l'équipement.

B.4 IEC 62369-1:2008 [12]

Les distances de mesure habituelles à partir du dispositif de détection électronique d'objets (EAS) sont de 20/30 cm. La mesure est réalisée à l'aide d'une grille placée tous les 10 ou 15 cm sur le torse et la tête (hauteur minimale de 85 cm). Des informations supplémentaires sont données en [12], décrivant la grille de mesure en fonction du type de système EAS.

B.5 IEC/TS 62597:2011 [14]

- Matériel roulant:
 - Travailleurs à l'intérieur:
 - METHODE DE SURFACE $\rightarrow h = 0,5$ m – 1 m – 1,5 m
 - METHODE DE VOLUME $\rightarrow h = 1$ m – 1,5 m et $d = 0,3$ m
 - Public à l'intérieur:
 - SURFACE METHODE VOLUME et METHODE $\rightarrow h = 0,3$ m – 1 m – 1,5 m et $d = 0,3$ m
 - Travailleurs et public à l'extérieur:
 - METHODE DE SURFACE et METHODE DE VOLUME $\rightarrow h = 0,5$ m – 1,5 m – 2,5 et $d = 0,3$ m
- Installation fixe:
 $h = 1$ m ou 1,5 m

$d = 10$ m (ligne principale) $d = 3$ m (transport urbain)

ZONES PROCHES DES INSTALLATIONS D'ALIMENTATION ELECTRIQUE FIXES:

Choisir entre deux ensembles: $h = 0,5$ m – 1 m – 1,5 m ou $h = 0,3$ m – 0,9 m – 1,5 m

QUAIS: $h = 0,5$ m – 1 m – 1,5 et $d = 0,3$ m

B.6 IEC 62493:2009 [13]

Figure B.1 – Équipement d'éclairage et distances de mesure (de [13])

Type d'équipement d'éclairage	Distance de mesure (cm)
Lampes de poche ^a	5 ^a
Équipement d'éclairage de bureau	30
Équipement d'éclairage mural	50
Éclairage au sol	50
Équipement d'éclairage suspendu	50
Équipement d'éclairage au plafond et/ou encastré pour les lampes à fluorescence avec une puissance d'entrée ^b ≤ 180 W	50
Équipement d'éclairage au plafond et/ou encastré pour les lampes à fluorescence avec une puissance d'entrée ^b > 180 W	70
Équipement d'éclairage au plafond et/ou encastré pour les lampes à décharge avec une puissance d'entrée ^b ≤ 180 W	70
Équipement d'éclairage au plafond et/ou encastré pour les lampes à décharge avec une puissance d'entrée ^b > 180 W	100
Équipement d'éclairage portatif	50
Projecteurs	200
Équipement d'éclairage public	200
Guirlandes lumineuses	50
Équipement d'éclairage de piscine et d'installations analogues	50
Équipement d'éclairage scénique et de studios de télévision ou de cinéma (extérieur et intérieur)	100
Équipement d'éclairage des hôpitaux et des bâtiments de santé	50
Équipement d'éclairage encastré au sol	50
Équipement d'éclairage d'aquarium	50
Veilleuses	50
Lampes à ballast intégré	30
Appareils à rayonnement ultraviolet et infrarouge	50
Éclairage de transport (installé dans les compartiments de trains ou dans les bus)	50
Autres équipements d'éclairage non mentionnés dans ce tableau	50
^a Il convient que la distance de mesure soit de 30 cm et que la valeur mesurée soit calculée à une distance de 5 cm (équation; $1/r^3$).	
^b Puissance nominale totale de l'équipement d'éclairage.	

Annexe C (normative)

Incertitude de mesure

C.1 Vue d'ensemble

Une fois le mesureur correctement étalonné, le nombre de mécanismes pouvant générer des erreurs de mesure est limité. Les sources d'incertitude qu'il convient de prendre en compte et de combiner aux incertitudes d'étalonnage, le cas échéant, sont indiquées ci-dessous.

NOTE Dans certains cas, dans l'Article C.2 et l'Article C.3, des estimations quantitatives de l'incertitude sont fournies (effets des champs non uniformes, par exemple), tandis que pour d'autres de brèves lignes directrices sont données pour leur détermination (effets de la température, par exemple). Pour d'autres sources d'incertitudes, l'attention est uniquement attirée sur leurs possibles influences.

C.2 Évaluation de l'incertitude de type A

Incertitude d'étalonnage: la valeur est indiquée dans le certificat d'étalonnage

Répétabilité de la mesure (voir 3.4). Les conditions de répétabilité sont les suivantes:

- même protocole de mesure;
- même observateur;
- même mesureur utilisé dans les mêmes conditions de mesure;
- même emplacement de mesure;
- délai court entre les répétitions (quelques minutes).

Reproductibilité de la mesure (Voir 3.5). Les conditions de reproductibilité sont les suivantes:

- différents mesureurs de champ ou types de mesureur;
- différents protocoles de mesure;
- différents observateurs;
- différentes conditions de mesure;
- différentes durées de mesure.

Le coefficient de reproductibilité peut être déterminé en participant à des comparaisons inter-laboratoires.

C.3 Évaluation de l'incertitude de type B

C.3.1 Champ non uniforme

Les plus grandes incertitudes peuvent se produire lorsque des mesures de champs magnétiques fortement non uniformes sont réalisées manuellement à proximité de sources comme des appareils électriques. Les sondes triaxiales n'ayant pas de centre commun (les exposimètres, par exemple) échantillonnent le champ en différents endroits. De plus, les sondes de mesureur de champ magnétique sont en principe étalonnées dans un champ magnétique pratiquement uniforme et sont utilisées pour mesurer un champ qui peut varier en $1/d^3$, d étant la distance par rapport à la source. Le centre de la sonde étant en général considéré comme l'emplacement de mesure, la valeur du champ magnétique est en réalité une moyenne de la composante normale du champ magnétique sur l'ensemble de la section transversale de la sonde. Dans certains cas, le champ moyen peut différer de manière significative de la valeur du champ central.

Les incertitudes liées au positionnement plus précis de la sonde de champ magnétique avec des orientations bien définies peuvent être réduites grâce à des supports réglables fabriqués avec des matériaux non conducteurs.

Bien que les mesureurs de champ électrique soient étalonnés dans un champ pratiquement uniforme, ils peuvent généralement être utilisés avec une légère incertitude pour mesurer les champs non uniformes. De plus, une distance minimale par rapport à l'objet doit être maintenue (voir 5.3). Par conséquent, l'incertitude générée par le caractère non uniforme du champ électrique sera négligeable dans la plupart des cas pratiques.

C.3.2 Limitations de la bande passante

Une bande passante limitée peut contribuer à l'incertitude de mesure et donner des résultats de mesure différents. Par exemple, la mesure des champs magnétiques provenant de certains écrans vidéo à l'aide d'un mesureur de champ de fréquence industrielle (c'est-à-dire un mesureur avec une bande passante étroite centrée vers 50/60 Hz) peut différer de plus de 20 % comparée aux mesures réalisées à l'aide de mesureurs à bandes passantes plus larges [24]. En effet, le champ magnétique d'un écran vidéo est riche en harmoniques qui ne peuvent pas être détectées avec un mesureur de fréquence industrielle. Si le champ magnétique ne contient aucune composante de fréquence industrielle, la différence ou l'erreur peut être beaucoup plus importante.

Pour limiter les signaux provenant de la sonde en raison de son mouvement dans le champ magnétique terrestre, la fréquence de coupure passe-haut du filtre du circuit du détecteur peut être augmentée, à condition que la fréquence plus élevée ne gêne pas les mesures (mesures des champs magnétiques $16^{2/3}$ Hz et 25 Hz de certains trains électriques, par exemple).

C.3.3 Température

L'influence de la température sur le fonctionnement du mesureur de champ est une autre source possible d'incertitude. Si des différences de température extrêmes sont prévues sur un site de mesure, comparées à la température au moment de l'étalonnage, il convient de connaître ou de caractériser les effets de la température ambiante. Si la température ne se trouve pas dans la plage recommandée par le fabricant, l'influence de la température peut être déterminée dans les conditions de l'étalonnage (IEC 61768-1), le mesureur de champ se trouvant à l'intérieur d'une chambre climatique. L'influence de la température est caractérisée par un facteur de multiplication par °C ou °K.

C.3.4 Humidité

L'humidité a un effet négligeable sur la mesure du champ magnétique.

L'humidité peut avoir une influence sur les mesureurs de champ électrique. Dans des conditions d'humidité élevée, une couche de condensation superficielle peut se former sur les parties d'un mesureur de champ électrique. La source principale d'incertitude peut provenir d'une fuite à travers l'isolation de montage de l'une des électrodes. Si cette fuite est importante, elle augmente énormément le courant induit dans la sonde et la lecture obtenue du mesureur de champ. Une incertitude moins importante est liée à une fuite entre les deux électrodes de mesure, qui réduit la lecture du mesureur de champ. Il convient que le mesureur de champ, sa poignée équipée et son isolation interne soient toujours propres et secs afin de limiter les erreurs dues aux courants de fuite.

L'influence de l'humidité ambiante sur les performances des mesureurs de champ électrique peut être déterminée par étalonnage avec le mesureur de champ dans une chambre climatique. L'humidité a un effet négligeable sur la mesure du champ électrique si l'humidité est inférieure à 70 % (IEC 61786-1, [23])

C.3.5 Emplacement des mesures

Des **incertitudes de mesure** peuvent se produire lors de la mesure de champs magnétiques et électriques non uniformes compte tenu de l'incertitude dans l'emplacement de mesure. La variation du champ mesuré B en fonction de la distance r peut être décrite par la relation

$$B = K \left(\frac{1}{r^\alpha} \right) \quad (\text{C.1})$$

où

$1 \leq \alpha \leq 3$ dans la plupart des cas,

K est une constante, c'est-à-dire que le champ alternatif contient une valeur efficace constante.

La différentielle de l'équation (C.1) par rapport à r donne

$$\partial B = B \left(-\frac{\alpha}{r} \right) \partial r \quad (\text{C.2})$$

En supposant une distribution rectangulaire de l'incertitude dans r , on peut démontrer que l'écart-type de la valeur de B , s_d , dû à l'incertitude dans $r(\Delta r)$, est

$$s_d = \pm \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \frac{\Delta r}{r} B \quad (\text{C.3})$$

Par exemple, en supposant que la source de champ magnétique est un dipôle ($\alpha = 3$), $\Delta r = 2$ mm, et $r = 500$ mm, $s_d = \pm 0,007B$.

C.3.6 Dérive à long terme

Compte tenu des modifications progressives des composants de l'instrument dans le temps, la réponse du mesureur de champs peut changer. Une vérification périodique de l'étalonnage (voir IEC 61786-1:2013, Article 6) offre un moyen de déterminer l'étendue des dérives à long terme et des facteurs de correction.

C.3.7 Constante de temps de l'instrument

Une autre source d'incertitude est due à la constante de temps du circuit du détecteur. Par exemple, si un mesureur doté d'un écran numérique est lu trop tôt après avoir été placé dans un champ élevé, la lecture peut être erronée. Les lectures peuvent également être erronées pour les champs à fluctuation rapide, à cause d'une durée de traitement du signal inadéquate.

Il convient de faire une distinction entre l'incertitude de mesure, qui peut être assez limitée avec une conception appropriée de l'instrumentation et un étalonnage précis, et la variabilité du champ due à des variations temporelles et spatiales. Les variations temporelles et spatiales du champ peuvent de loin dépasser les incertitudes d'une mesure. Elles sont abordées à l'Article 5.1.

C.3.8 Effet de proximité de l'observateur (pour le champ électrique)

La proximité d'un observateur est négligeable s'il se trouve à plus de 2 m de la sonde de champ électrique.

C.3.9 Facteur de correction

Ce facteur est donné dans le certificat d'étalonnage. Pour le mesureur triaxial, il peut être composé de 1 valeur ou de 3 valeurs (1 valeur étant une moyenne). Il convient donc d'être prudent dans l'utilisation des facteurs de correction.

Un exemple d'utilisation du facteur de correction est donné en Annexe D.

C.3.10 Hystérésis entre échelles

Lors de l'utilisation d'un mesureur de champ avec sélection automatique de calibre, il convient de faire attention aux changements de calibre. Par exemple, si le champ mesuré est proche de la valeur du calibre, une petite variation du champ peut modifier le calibre. Le champ mesuré serait dans la partie inférieure du calibre supérieur, ce qui pourrait induire une incertitude supplémentaire.

Annexe D (informative)

Exemple d'incertitude de mesure

Table A.1 donne un exemple de calcul d'incertitude pour la mesure du champ magnétique dans un lieu public sous une ligne aérienne très haute tension de 50 Hz. L'équipement de mesure utilisé est une sonde NARDA EHP-50C connectée à un PMM 8053B, avec un calibre de 100 μ T. Les mesures sont réalisées à 1 m au-dessus du sol.

Les sources d'incertitude prises en compte pour l'analyse du système de mesure sont décrites à l'Annexe C.

Tableau D.1 – Exemple d'incertitude de mesure

Sources d'incertitude	Référence	Valeur de l'incertitude u_{v_i}	Distribution de probabilité	Facteur de division k_i	Coefficient de sensibilité C_i	Incertitude type $u_i = u_{v_i} / k_i$
Statistique	Type A					
Étalonnage de l'EHP-50C	A1	0,50 %	Normal	2	1	0,25 %
Répétabilité	A2	4,00 %	Normal	2	1	2,00 %
Reproductibilité	A3	4,00 %	Normal	2	1	2,00 %
Équipement	Type B					
Champ magnétique non uniforme	B1	1,00 %	Rectangulaire	3,464	1	0,29 %
Limitation de la bande passante	B3	1,00 %	Rectangulaire	3,464	1	0,29 %
Constante de temps de l'instrument	B7	0,20 %	Rectangulaire	3,464	1	0,06 %
Dérive à long terme	B8	4,00 %	Rectangulaire	3,464	1	1,15 %
Facteur de correction	B10	4,00 %	Rectangulaire	3,464	1	1,15 %
Résolution	B11	0,01 %	Rectangulaire	3,464	1	0,00 %
Hystérésis de calibre	B12	0,00 %	Rectangulaire	3,464	1	0,00 %
Température	B13	0,04 %	U	2,828	1	0,01 %
Humidité	B14	0,00 %	Rectangulaire	3,464	1	0,00 %
Incertitude type composée			$u_c = \sqrt{\sum_1^m c_i^2 \cdot u_i^2}$			3,09 %
Incertitude élargie (intervalle de confiance de 95 %)			Normale	$u_e = 2u_c$		6,19 %
Température ambiante: entre 0 °C et 40 °C, temps d'intégration: 1 s.						

Bibliographie

- [1] BÖRNER, F., et al. *Electromagnetic fields at workplaces - a new scientific approach to occupational health and safety*. Bonn: Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2011. ISBN FB400
- [2] BOTTURA, V., et al. Urban exposure to ELF magnetic field due to high-, medium- and low-voltage electricity supply networks. *Radiation Protection Dosimetry*, 2009, vol. 137, no. 3-4, p. 214-217
- [3] CAOLA, R.J., et al. Measurements of Electric and Magnetic Fields in and Around Homes Near a 500 KV Transmission Line. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1983, vol. PAS-102, no. 10, p. 3338-3347
- [4] 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
- [5] DIETRICH, F.M., et al. *Comparison of magnetic and electric fields of conventional and advanced electrified transportation systems*. 1993
- [6] DIETRICH, F.M. AND JACOBS, W.L. *Survey and Assessment of Electric and Magnetic Field (EMF) Public Exposure in the Transportation Environment*. 1999, no. Report No. PB99-130908
- [7] DIPLACIDO, J., et al. Analysis of the proximity effects in electric field measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, vol. PAS-97, p. 2167-2177.
- [8] HEINRICH, H. AND BÖRNER, F. *Summation Formulae – Facts and Fiction*. The Bioelectromagnetics Society 30th Annual Meeting. San Diego, 2008, p. 33-34
- [9] IEC 62110:2009, *Champs électriques et magnétiques générés par les systèmes d'alimentation à courant alternatif – Procédures de mesure des niveaux d'exposition du public*
- [10] IEC 62233:2005, *Méthodes de mesures des champs électromagnétiques des appareils électrodomestiques et similaires en relation avec l'exposition humaine*
- [11] IEC 62311:2007, *Evaluation des équipements électroniques et électriques en relation avec les restrictions d'exposition humaine aux champs électromagnétiques (0 Hz – 300 GHz)*
- [12] IEC 62369-1:2008, *Evaluation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques produits par les dispositifs radio à courte portée dans la plage de fréquence 0 GHz à 300 GHz – Partie 1: Champs produits par les dispositifs utilisés pour la surveillance électronique des objets, l'identification par radiofréquence et les systèmes similaires*.
- [13] IEC 62493:2009, *Evaluation d'un équipement d'éclairage relativement à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques*
- [14] IEC/TS 62597:2011 *Procédures de mesure des niveaux de champ magnétique générés par les appareils électriques et électroniques dans l'environnement ferroviaire en regard de l'exposition humaine*.
- [15] IEEE STD 644-1994, *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*
- [16] IEEE STD 738-2006, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*

- [17] IEEE STD C95.1:2005. *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.*
- [18] IEEE STD C95.6:2002, *IEEE Standard for Safety Levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz*
- [19] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).* *Health Phys*, 1998, vol. 74, no. 4, p. 494-522
- [20] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, *Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines.* *Health Phys*, 2003, vol. 84, no. 3, p. 383-387
- [21] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz).* *Health Phys*, 2010, vol. 99, no. 6, p. 818-836
- [22] KAUNE, W.T., et al. Residential magnetic and electric fields. *Bioelectromagnetics*, 1987, vol. 8, no. 4, p. 315-335
- [23] KORPINEN, L.H., et al. Influence of relative humidity on analyzing electric field exposure using ELF electric field measurements. *Bioelectromagnetics*, 2013, vol. 34, no. 5, p. 414-418
- [24] MISAKIAN, M., et al. Measurements of power frequency magnetic fields away from power lines. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1991, vol. 6, no. 2, p. 901-911
- [25] REILLY, J.P. *Applied Bioelectricity - from electrical stimulation to electropathology.* New-York: Springer, 1998. ISBN 0-387-98407-0
- [26] RENEW, D.C., et al. A method for assessing occupational exposure to power-frequency magnetic fields for electricity generation and transmission workers. *Journal of Radiological Protection*, 2003, vol. 23, no. 3, p. 279
- [27] SAHL, J.D., et al. Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among electric utility workers. *Epidemiology*, 1993, vol. 4, no. 2, p. 104-114
- [28] SAVITZ, D.A. AND LOOMIS, D.P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol*, 1995, vol. 141, no. 2, p. 123-134
- [29] SWANSON, J. Measurements of static magnetic fields in homes in the UK and their implication for epidemiological studies of exposure to alternating magnetic fields. *J. Radiol. Prot.*, 1994, vol. 14, no. 1, p. 67-75
- [30] THERIAULT, G., et al. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970-1989. *Am J Epidemiol*, 1994, vol. 139, no. 6, p. 550-572
- [31] UK CHILDHOOD CANCER STUDY INVESTIGATORS Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators. *Lancet*, 1999, vol. 354, no. 9194, p. 1925-1931

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