

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61786

Première édition
First edition
1998-08

**Mesure de champs magnétiques et électriques
à basse fréquence dans leur rapport à l'exposition
humaine – Prescriptions spéciales applicables
aux instruments et recommandations
pour les procédures de mesure**

**Measurement of low-frequency magnetic
and electric fields with regard to exposure
of human beings – Special requirements for
instruments and guidance for measurements**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61786:1998

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- **«Site web» de la CEI***
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*.

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*.

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61786

Première édition
First edition
1998-08

**Mesure de champs magnétiques et électriques
à basse fréquence dans leur rapport à l'exposition
humaine – Prescriptions spéciales applicables
aux instruments et recommandations
pour les procédures de mesure**

**Measurement of low-frequency magnetic
and electric fields with regard to exposure
of human beings – Special requirements for
instruments and guidance for measurements**

© IEC 1998 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE XC

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
 Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Définitions	10
4 Symboles.....	20
5 Mesure des champs magnétiques alternatifs	22
5.1 Spécifications relatives aux instruments	22
5.2 Etalonnage	30
5.3 Incertitude de mesure	38
5.4 Enregistrement et consignation des résultats de mesure	40
5.5 Méthode de mesure	42
6 Mesure des champs électriques alternatifs.....	44
6.1 Spécifications relatives aux instruments	44
6.2 Etalonnage	48
6.3 Incertitude de mesure	54
6.4 Enregistrement et consignation des résultats de mesure	54
6.5 Méthode de mesure	56
 Annexes	
A (normative) Méthodes d'étalonnage.....	60
B (normative) Sources d'incertitude de mesure.....	82
C (informative) Caractéristiques générales des champs électriques et magnétiques	104
D (informative) Capteurs d'induction magnétique (capteurs de champ magnétique) – Recommandations pour les mesures	112
E (informative) Capteurs de champ électrique – Recommandations pour les mesures ..	142
F (informative) Instruments de mesure de champs magnétiques statiques	164
G (informative) Unités	166
H (informative) Bibliographie	168

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references.....	9
3 Definitions	11
4 Symbols	21
5 Measurement of alternating magnetic fields	23
5.1 Instrumentation specifications	23
5.2 Calibration	31
5.3 Measurement uncertainty	39
5.4 Recording and reporting measurement results.....	41
5.5 Measurement procedure	43
6 Measurement of alternating electric fields	45
6.1 Instrumentation specifications	45
6.2 Calibration	49
6.3 Measurement uncertainty	55
6.4 Recording and reporting measurement results.....	55
6.5 Measurement procedure	57
Annexes	
A (normative) Calibration methods.....	61
B (normative) Sources of measurement uncertainty	83
C (informative) General characteristics of quasi-static magnetic and electric fields	105
D (informative) Magnetic flux density meters (magnetic field meters) – Guidance for measurements	113
E (informative) Electric field strength meters (electric field meters) – Guidance for measurements	143
F (informative) Static magnetic field-measuring instrumentation	165
G (informative) Units	167
H (informative) Bibliography	169

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES
À BASSE FRÉQUENCE DANS LEUR RAPPORT
À L'EXPOSITION HUMAINE –
PRESCRIPTIONS SPÉCIALES APPLICABLES AUX INSTRUMENTS
ET RECOMMANDATIONS POUR LES PROCÉDURES DE MESURE**

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61786 a été établie par le comité d'études 85 de la CEI: Appareillage de mesure des grandeurs électromagnétiques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
85/191/FDIS	85/193/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.

Les annexes A et B font partie intégrante de cette norme.

Les annexes C, D, E, F, G et H sont données uniquement à titre d'information.

Les termes en caractères **gras** sont définis à l'article 3.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT OF LOW-FREQUENCY MAGNETIC AND ELECTRIC FIELDS
WITH REGARD TO EXPOSURE OF HUMAN BEINGS –
SPECIAL REQUIREMENTS FOR INSTRUMENTS AND
GUIDANCE FOR MEASUREMENTS**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61786 has been prepared by IEC technical committee 85: Measuring equipment for electromagnetic quantities.

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

FDIS	Report on voting
85/191/FDIS	85/193/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.

Annexes A and B form an integral part of this standard.

Annexes C, D, E, F, G and H are for information only.

Words in **bold** in the text are defined in clause 3.

INTRODUCTION

L'intérêt croissant pour caractériser l'exposition des êtres humains aux champs magnétiques et électriques quasi statiques dans bon nombre d'environnements a conduit au développement et à la commercialisation d'un grand nombre d'instruments de mesure de champs avec une grande variété de spécifications. Parmi les sources de **champs quasi statiques** figurent des dispositifs qui fonctionnent à la fréquence industrielle (50/60 Hz) et qui produisent des champs à la fréquence industrielle et à ses harmoniques, ainsi que des dispositifs qui produisent des champs indépendants de la fréquence industrielle. Parmi les exemples de dispositifs appartenant à cette dernière catégorie, il est possible de citer les écrans d'affichage vidéo (champ magnétique de balayage vertical), les chemins de fer électriques (16^{2/3} Hz et 25 Hz), les systèmes de transport en commun (0 Hz à 3 kHz selon les caractéristiques des systèmes d'entraînement à vitesse variable), les avions commerciaux (400 Hz), les appareils de chauffage à induction (50 Hz à 9 kHz), et les automobiles électriques. En raison des différences existant entre les caractéristiques des champs générés par les sources dans les divers environnements, par exemple les composantes fréquentielles, les variations temporelles et spatiales, la polarisation et l'amplitude, les prescriptions applicables aux instruments et les procédures de mesure seront différentes dans les divers environnements. Il existe, dans le commerce, des instruments pour mesurer l'exposition des êtres humains à l'amplitude des champs ainsi qu'à d'autres paramètres qui caractérisent les champs. Le présent document traite essentiellement des instruments et des méthodes de mesure dans le rapport qu'ils peuvent avoir à l'exposition humaine. Il convient cependant de préciser que les paramètres décrivant les **champs quasi statiques** et leurs mécanismes d'interaction avec les êtres humains lors d'expositions aux champs magnétiques et électriques restent encore inconnus.

Parmi les utilisateurs visés par la présente Norme internationale figurent les fabricants d'instruments ainsi que des groupes ou des individus intéressés par la caractérisation de l'exposition des êtres humains aux champs magnétiques et électriques quasi statiques. On suppose que les utilisateurs qui envisagent d'effectuer des mesures ont une certaine connaissance des instruments ainsi que des sources de champs et de leurs caractéristiques. Si tel n'est pas le cas, il est vivement conseillé de suivre une formation. La présente norme peut servir de support de formation en raison des informations techniques contenues dans les annexes.

INTRODUCTION

The increasing interest in characterizing human exposure to quasi-static magnetic and electric fields in a number of environments has led to the development and marketing of many field meters with a range of specifications. Sources of **quasi-static fields** include devices that operate at power frequencies (50/60 Hz) and produce power frequency and power frequency harmonic fields, as well as devices which produce fields that are independent of the power frequency. Examples in the latter category include video display terminals (vertical scan magnetic field), electric railroads (16^{2/3} Hz and 25 Hz), mass transportation systems (0 Hz to 3 kHz depending on characteristics of adjustable speed drive), commercial airplanes (400 Hz), induction heaters (50 Hz to 9 kHz), and electric automobiles. 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, the instrumentation requirements and measurement procedures will be different in the various environments. Commercially available instrumentation exists to measure human exposure to the field levels as well as to other parameters that characterize the fields. The instrumentation and measurement methods, as they may pertain to human exposure, are the focus of this document. It should be noted that the parameters that describe **quasi-static fields** and the mechanisms for their interaction with humans during magnetic and electric field exposure are still unknown.

The intended users of this International Standard include manufacturers of instrumentation and groups or individuals interested in characterizing quasi-static magnetic and electric fields as they relate to human exposure. It is assumed that users intending to perform measurements have some knowledge of the instrumentation as well as field sources and their characteristics. In the absence of such knowledge, it is strongly advised that some training be received. This standard may serve as a textbook for the training process because of the technical information provided in the annexes.

MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES ET ÉLECTRIQUES À BASSE FRÉQUENCE DANS LEUR RAPPORT À L'EXPOSITION HUMAINE – PRESCRIPTIONS SPÉCIALES APPLICABLES AUX INSTRUMENTS ET RECOMMANDATIONS POUR LES PROCÉDURES DE MESURE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale fournit des recommandations pour la mesure des valeurs efficaces en régime entretenu des champs magnétiques et électriques quasi statiques avec des composantes fréquentielles comprises entre 15 Hz et 9 kHz. Parmi les sources possibles de **champs quasi statiques** figurent des dispositifs qui fonctionnent aux fréquences industrielles et qui produisent des champs à ces fréquences industrielles et aux fréquences harmoniques des fréquences industrielles, ainsi que des dispositifs qui produisent des champs indépendants de la fréquence industrielle. Les plages d'amplitudes couvertes par la présente norme vont respectivement de 100 nT à 100 mT et de 1 V/m à 50 kV/m pour les champs magnétiques et les champs électriques. Lorsque des mesures sont effectuées en dehors de cette plage, la plupart des dispositions de la présente norme restent applicables, mais il est possible que certaines dispositions, telles que l'incertitude et la procédure d'étalonnage spécifiées, nécessitent une modification. De façon spécifique, la présente norme

- définit la terminologie;
- identifie les spécifications requises pour les capteurs de champ;
- indique les méthodes d'étalonnage;
- définit les prescriptions applicables à l'incertitude des instruments;
- décrit les caractéristiques générales des champs;
- étudie les principes de fonctionnement des instruments de mesure;
- décrit les méthodes de mesure permettant d'atteindre les objectifs définis quant à l'exposition des êtres humains.

Les sources d'incertitude, pendant l'étalonnage et les mesures, sont également identifiées et des recommandations sont données sur la manière dont il convient de les combiner pour déterminer l'**incertitude de mesure** totale. En ce qui concerne les mesures de champs électriques, la présente norme considère uniquement la mesure du champ électrique non perturbé en un point de l'espace (c'est-à-dire le champ électrique avant l'intervention du capteur du champ et de l'opérateur) ou sur des surfaces conductrices.

NOTE – En raison des exigences liées aux formats, il n'a pas été possible d'éviter une certaine séparation entre les prescriptions normatives applicables aux mesures dans les articles 5 et 6 d'une part, et les protocoles de mesure cités en exemple et les recommandations pour les mesures dans les annexes D et E d'autre part.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions de la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

CEI 61000-3-2: 1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3: Limites – Section 2: Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase)*

MEASUREMENT OF LOW-FREQUENCY MAGNETIC AND ELECTRIC FIELDS WITH REGARD TO EXPOSURE OF HUMAN BEINGS – SPECIAL REQUIREMENTS FOR INSTRUMENTS AND GUIDANCE FOR MEASUREMENTS

1 Scope

This International Standard provides guidance for measuring the steady-state root-mean-square (r.m.s.) values of quasi-static magnetic and electric fields which have a frequency content in the range 15 Hz to 9 kHz. Sources of **quasi-static 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. The magnitude ranges covered by this standard are 100 nT to 100 mT and 1 V/m to 50 kV/m for magnetic fields and electric fields, respectively. When measurements outside this range are performed, most of the provisions of this standard will still apply, but certain provisions such as specified uncertainty and calibration procedure may need modification. Specifically, this standard

- defines terminology;
- identifies requisite field meter specifications;
- indicates methods of calibration;
- defines requirements on instrumentation uncertainty;
- describes general characteristics of fields;
- surveys operational principles of instrumentation;
- describes measurement methods that achieve defined goals pertaining to human exposure.

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

NOTE – Some separation between the normative measurement requirements in clauses 5 and 6 and the example measurement protocols and guidance for measurements in annexes D and E is unavoidable because of format requirements.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 61000-3-2:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*

CEI 61000-4-2: 1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 2: Essais d'immunité aux décharges électrostatiques*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-4-3: 1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 3: Essais d'immunité aux champs électromagnétiques, rayonnés, aux fréquences radioélectriques*

CEI 61000-4-4: 1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 4: Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salves*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-4-6:1996, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 6: Immunité aux perturbations conduites, induites par les champs radioélectriques*

CEI 61000-4-8:1993, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 8: Essais d'immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau*. Publication fondamentale en CEM

CISPR 11:1990, *Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations électromagnétiques des appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM) à fréquence radioélectrique*

ISBN 92-67-01075-1:1993, *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*, Organisation internationale de normalisation

ISBN 92-67-10188-9:1995, ISO TAG, ISO Technical Advisory Group on Metrology, Groupe de travail 3, *Directive pour l'expression de l'incertitude de mesure*

IEEE Std 539:1990, *Norme IEEE, Définitions de termes se rapportant aux effluves et aux effets de champs dus aux lignes d'alimentation aériennes*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes s'appliquent:

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

3.1 Essais

3.1.1

essais de réception

essai contractuel ayant pour objet de prouver au client que le dispositif répond à certaines conditions de sa spécification

3.1.2

essai de type

essai effectué sur un ou plusieurs dispositifs réalisés selon une conception donnée pour vérifier que cette conception répond à certaines spécifications

NOTE – Cet essai est normalement effectué par le concepteur/fabricant du dispositif.

IEC 61000-4-2:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 2: Electrostatic discharge immunity test* – Basic EMC Publication

IEC 61000-4-3:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 3: Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*

IEC 61000-4-4:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 4: Electrical fast transient/burst immunity test* – Basic EMC publication

IEC 61000-4-6:1996, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 6: Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields*

IEC 61000-4-8:1993, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test* – Basic EMC Publication

CISPR 11:1990, *Limits and methods of measurement of electromagnetic disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment*

ISBN 92-67-01075-1:1993, *International vocabulary of basic and general terms in metrology*, International Organization for Standardization.

ISBN 92-67-10188-9:1995, ISO TAG, ISO Technical Advisory Group on Metrology, Working Group 3, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*.

IEEE Std 539:1990, *IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines*.

3 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply.

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

3.1 Tests

3.1.1

acceptance tests

contractual test to prove to the customer that the device meets certain conditions of its specifications

3.1.2

type test

test of one or more devices made to a certain design to show that the design meets certain specifications

NOTE – This test is normally performed by the designer/manufacture of the device.

3.2 Capteurs

3.2.1

capteur de champ électrique alternatif

appareil destiné à mesurer des champs électriques alternatifs. Il existe trois types de capteurs de champ électrique: **capteurs d'espace libre**, **capteurs de paroi**, **capteurs électro-optiques**.

NOTE – Les capteurs de champ électrique se composent de deux parties: la sonde ou partie sensible au champ, et le détecteur qui traite le signal provenant de la sonde et indique la valeur efficace du champ électrique sur un dispositif d'affichage analogique ou numérique.

3.2.2

capteur électro-optique

appareil servant à mesurer le champ électrique par l'intermédiaire des variations de transmission de la lumière à travers une fibre ou un cristal, sous l'effet du champ électrique

NOTE – Bien qu'il existe plusieurs méthodes électro-optiques permettant de mesurer les champs électriques, par exemple l'effet Pockels, l'effet Kerr, et des techniques interférométriques, la présente norme ne traite que des **capteurs électro-optiques** qui utilisent l'effet Pockels.

3.2.3

capteur d'espace libre

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

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

3.2.4

magnétomètre à noyau saturable

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

3.2.5

capteur de paroi

appareil servant à mesurer le champ électrique à la surface d'une paroi ou d'un sol, ou près de cette surface, et dont le principe de fonctionnement repose souvent sur la mesure du courant induit ou de la charge induite oscillant entre une électrode isolée et le sol. L'électrode isolée est habituellement une plaque située au niveau de la surface du sol ou légèrement au-dessus de celle-ci.

NOTE – Les **capteurs de paroi** destinés à mesurer le courant induit contiennent souvent un circuit intégrateur destiné à compenser la relation de dérivation entre le courant induit et le champ électrique.

3.2.6

capteur d'induction magnétique

appareil destiné à mesurer l'induction magnétique

NOTE 1 – Les capteurs de champ magnétique se composent de deux parties: la sonde ou partie sensible au champ, et le détecteur qui traite le signal provenant de la sonde et indique la valeur efficace du champ magnétique sur un dispositif d'affichage analogique ou numérique.

NOTE 2 – Divers types d'appareils sont d'usage courant, par exemple les capteurs de champ munis de sondes inductives, les capteurs munis de **sondes à effet Hall**, et les capteurs associant deux **bobines** à un noyau ferromagnétique, comme dans le cas d'un **magnétomètre à noyau saturable**.

3.2.7

dosimètre

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

3.2 Meters

3.2.1

alternating electric field strength meter

meter designed to measure alternating electric fields. Three types of electric field strength meters are available: **free-body meter**, **ground reference meter**, **electro-optic meter**.

NOTE – Electric field meters consist of two parts: the probe or field-sensing element, and the detector which processes the signal from the probe and indicates the r.m.s. value of the electric field with an analogue or digital display.

3.2.2

electro-optic meter

meter that measures the electric field strength by changes in the transmission of light through a fibre or crystal which are due to the influence of the electric field

NOTE – While there are several electro-optic methods that can be used for measuring electric fields, e.g. the Pockels effect, the Kerr effect, and interferometric techniques, this standard only considers electro-optic field meters that utilize the Pockels effect.

3.2.3

free-body meter

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

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

3.2.4

fluxgate magnetometer

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

3.2.5

ground reference meter

meter that measures the electric field at or close to the surface of the ground, frequently implemented by measuring the induced current or charge oscillating between an isolated electrode and ground. The isolated electrode is usually a plate located level with or slightly above the ground surface.

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

3.2.6

magnetic flux density meter

meter designed to measure the magnetic flux density

NOTE 1 – Magnetic field meters consist of two parts: the probe or field-sensing element, and the detector which processes the signal from the probe and indicates the r.m.s. value of the magnetic field with an analogue or digital display.

NOTE 2 – Several types of meters are in common use, e.g. field meters with **coil probes**, meters with **Hall-effect probes**, and meters that combine two coils with a ferromagnetic core as in a **fluxgate magnetometer**.

3.2.7

survey meter

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

3.2.8

sonde à bobine (ou bobine)

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

NOTE 1 – Etant donné que la tension induite est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'induction magnétique, il est nécessaire que le circuit détecteur du capteur contienne un étage intégrateur destiné à restituer la forme d'onde de l'induction magnétique.

NOTE 2 – Cette sonde peut également servir à mesurer l'induction magnétique statique (c.c.) si la sonde est mise en rotation.

3.2.9

sonde à effet Hall

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

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

3.3 Caractéristiques des capteurs

3.3.1

facteur de crête

pour des fonctions périodiques, rapport entre la valeur de crête du signal (pic, maximum) et sa valeur efficace

3.3.2

diaphonie

bruit ou signal parasite généré par des signaux alternatifs ou des impulsions dans des circuits adjacents

3.3.3

réponse en fréquence

réponse (lecture) d'un capteur de champ à un champ d'amplitude constante en fonction de la fréquence

3.3.4

bande passante

(1) (transmission de données) plage du spectre de fréquence qui peut passer en étant faiblement atténuée

(2) (circuits et systèmes) bande de fréquences qui passe à travers un filtre avec une faible atténuation (par rapport à d'autres bandes de fréquences telles qu'une bande atténuée)

3.3.5

détecteur de valeur redressée (étalonné en valeur efficace) (voir 3.3.6)

circuit détecteur qui redresse le signal provenant de la sonde et qui est étalonné pour donner la valeur efficace correcte d'un champ sinusoïdal à une fréquence donnée

NOTE – S'il y a des harmoniques dans le champ, un capteur de champ muni d'un **détecteur de valeur redressée** (efficace) n'indiquera pas la vraie valeur efficace du champ si le signal provenant de la sonde est proportionnel à la dérivée temporelle du champ. Si le détecteur contient un étage intégrateur, l'erreur est réduite. L'erreur dépendra également de la relation de phase entre les composantes harmoniques et la fondamentale du champ [36],[61].

3.3.6

détecteur de valeur efficace vraie (voir détecteur de valeur redressée (étalonné en valeur efficace))

détecteur qui contient un élément de circuit qui effectue l'opération mathématique

3.2.8

coil probe

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

NOTE 1 – Since the induced voltage is proportional to the time derivative of the magnetic flux density, the detector circuit of the sensor requires an integrating stage to recover the waveform of the magnetic flux density.

NOTE 2 – This probe can also be used to measure static (d.c.) magnetic flux density if the probe is rotated.

3.2.9

Hall effect probe

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

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

3.3 Meter characteristics

3.3.1

crest factor

for periodic functions, the ratio of the waveform crest (peak, maximum) value to its r.m.s. value

3.3.2

crosstalk

noise or extraneous signal caused by a.c. or pulse-type signals in adjacent circuits

3.3.3

frequency response

response (reading) of a field meter to a field of constant amplitude but different frequencies

3.3.4

pass-band

- (1) (data transmission) a range of frequency spectra which can pass at low attenuation
- (2) (circuits and systems) a band of frequencies that pass through a filter with little attenuation (relative to other frequency bands such as a stop-band)

3.3.5

rectified average (calibrated in r.m.s.) detector (see 3.3.6)

detector circuit that rectifies the signal from the probe and is calibrated to give the correct r.m.s. value of a sinusoidal field at a given frequency

NOTE – If there are harmonics in the field, a field meter with a **rectified average (r.m.s.) detector** will not indicate the true r.m.s. value of the field if the signal from the probe is proportional to the time derivative of the field. If the detector contains a stage of integration, the error is reduced. The error will also be a function of the phase relation between the harmonic and fundamental field components [36], [61].

3.3.6

true r.m.s. detector (see rectified average (calibrated in r.m.s.) detector)

detector that contains a circuit component that performs the mathematical operation

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} \quad (1)$$

par rapport à un signal périodique $v(t)$, où T est la période du signal.

NOTE 1 – Si $v(t)$ est proportionnel à la dérivée temporelle du champ, il est nécessaire que le circuit détecteur contienne également un étage intégrateur avant l'opération donnant la valeur efficace afin de restituer la forme d'onde de l'induction magnétique [25], [61]. Ce type de détecteur donne la valeur efficace vraie d'un champ contenant des harmoniques, à condition que la **réponse en fréquence** du détecteur soit plate sur la plage de fréquences concernée.

NOTE 2 – Si des niveaux importants d'harmoniques sont présents dans le signal $v(t)$, il convient de prêter une attention particulière à la possible saturation de l'amplificateur si l'intégration suit un ou plusieurs étages d'amplification.

3.4 Caractéristiques des champs

3.4.1

valeur efficace maximale du champ électrique (champ électrique maximal)

mesure de champs électriques et magnétiques quasi statiques à polarisation elliptique. En un point donné, valeur efficace du demi-grand axe de l'ellipse du champ électrique

3.4.2

valeur efficace maximale du champ magnétique (champ magnétique maximal)

mesure des champs électriques et magnétiques à des fréquences industrielles. En un point donné, valeur efficace du demi-grand axe de l'ellipse du champ magnétique

3.4.3

champ perturbé

champ dont l'amplitude ou la direction a changé, ou les deux à la fois, sous l'effet de l'introduction d'un objet

NOTE – Le champ électrique à la surface de l'objet est, en général, fortement perturbé par la présence de l'objet. Aux fréquences industrielles, l'induction magnétique n'est pas, en général, fortement perturbée par la présence d'objets exempts de matériaux magnétiques. Il existe toutefois des exceptions à cela, parmi lesquelles les régions proches de la surface de conducteurs électriques épais et les régions éloignées des conducteurs épais, si le conducteur est proche de la source de champ magnétique. Dans ces cas, la perturbation est due à des champs magnétiques opposés produits par les courants de Foucault dans les conducteurs.

3.4.4

champ non perturbé

champ qui aurait dû exister en un point, en l'absence de personnes ou d'objets mobiles

3.4.5

champ quasi statique

champ qui satisfait à la condition $f \ll c/l$, où f est la fréquence du champ, c est la vitesse de la lumière, et l est une dimension caractéristique de la géométrie de mesure, par exemple la distance entre la source de champ et le point de mesure

NOTE – Les champs magnétiques et électriques à la fréquence industrielle, à proximité de lignes d'alimentation d'énergie et d'appareils électriques, constituent des exemples de **champs quasi statiques**.

3.4.6

champ électrique résultant

champ électrique donné par l'expression

$$E_R = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2)$$

où E_x , E_y , et E_z sont les valeurs efficaces des trois composantes orthogonales du champ

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} \quad (1)$$

to a periodic signal $v(t)$, where T is the period of the signal.

NOTE 1 – If $v(t)$ is proportional to the time-derivative of the field, the detector circuit also requires a stage of integration prior to the r.m.s. operation in order to recover the waveform of the magnetic flux density [25], [61]. This type of detector gives the true r.m.s. value of a field containing harmonics provided that the **frequency response** of the detector is flat over the frequency range of interest.

NOTE 2 – If significant levels of harmonics are present in $v(t)$, particular attention should be given to the possibility of amplifier saturation effects if the integration follows one or more stages of amplification.

3.4 Field characteristics

3.4.1

maximum r.m.s. value of electric field (maximum electric field)

measurement of elliptically polarized quasi-static electric and magnetic fields. At a given point, the root-mean-square (r.m.s.) value of the semi-major axis of the electric field ellipse

3.4.2

maximum r.m.s. value of magnetic field (maximum magnetic field)

measurement of power frequency electric and magnetic fields. At a given point, the root-mean-square (r.m.s.) value of the semi-major axis of the magnetic field ellipse

3.4.3

perturbed field

field that is changed in magnitude or direction, or both, by the introduction of an object

NOTE – The electric field at the surface of the object is, in general, strongly perturbed by the presence of the object. At power frequencies, the magnetic flux density is not, in general, greatly perturbed by the presence of objects that are free of magnetic materials. Exceptions to this include regions near the surface of thick electrical conductors and regions far from thick conductors, if the conductor is close to the magnetic field source. The perturbation in these instances is due to opposing magnetic fields produced by eddy currents in the conductors.

3.4.4

unperturbed field

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

3.4.5

quasi-static field

field that satisfies the condition $f \ll c/l$, where f is the frequency of the field, c is the speed of light, and l is a characteristic dimension of the measurement geometry, e.g. the distance between the field source and the measurement point

NOTE – Power frequency magnetic and electric fields near power lines and appliances are examples of **quasi-static fields**.

3.4.6

resultant electric field

electric field given by the expression

$$E_R = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2)$$

where E_x , E_y , and E_z are the r.m.s. values of the three orthogonal field components

Le **champ électrique résultant** est également donné par l'expression

$$E_R = \sqrt{E_{\max}^2 + E_{\min}^2} \quad (3)$$

où E_{\max} et E_{\min} sont les valeurs efficaces respectives du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse du champ électrique. Le champ résultant E_R est toujours $\geq E_{\max}$. Si le champ électrique est polarisé linéairement, $E_{\min} = 0$ et $E_R = E_{\max}$. Si le champ électrique est polarisé circulairement, $E_{\max} = E_{\min}$ et $E_R \approx 1,41 E_{\max}$.

NOTE – La définition de «intensité efficace du champ» dans le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] équivaut à celle du **champ magnétique résultant** ou à celle du **champ électrique résultant**, selon le cas.

3.4.7

champ magnétique résultant

champ magnétique donné par l'expression

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4)$$

où B_x , B_y , et B_z sont les valeurs efficaces des trois composantes orthogonales du champ.

Le **champ magnétique résultant** est également donné par l'expression

$$B_R = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} \quad (5)$$

où B_{\max} et B_{\min} sont les valeurs efficaces respectives du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse du champ magnétique. Le **champ magnétique résultant** B_R est toujours $\geq B_{\max}$. Si le champ magnétique est polarisé linéairement, $B_{\min} = 0$ et $B_R = B_{\max}$. Si le champ magnétique est polarisé circulairement, $B_{\max} = B_{\min}$ et $B_R \approx 1,41 B_{\max}$.

NOTE – La définition de l'«intensité efficace du champ» dans le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] équivaut à celle du **champ magnétique résultant** ou à celle du **champ électrique résultant**, selon le cas applicable.

3.5 Mesures

3.5.1

facteur de correction

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

NOTE – Puisque l'erreur connue ne peut être déterminée parfaitement, la compensation ne peut être complète.

3.5.2

facteur de couverture

facteur numérique utilisé comme un coefficient multiplicatif de l'**incertitude standard** totale afin d'obtenir une **incertitude de mesure** étendue

NOTE – 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 pourcentage de la distribution pour un **facteur de couverture** $k = 1, 2, \text{ et } 3$, respectivement.

3.5.3

facteur d'échelle

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

The **resultant electric field** is also given by the expression

$$E_R = \sqrt{E_{\max}^2 + E_{\min}^2} \quad (3)$$

where E_{\max} and E_{\min} are the r.m.s. values of the semi-major and semi-minor axes of the electric field ellipse, respectively. The resultant E_R is always $\geq E_{\max}$. If the electric field is linearly polarized, $E_{\min} = 0$ and $E_R = E_{\max}$. If the electric field is circularly polarized, $E_{\max} = E_{\min}$ and $E_R \approx 1,41 E_{\max}$.

NOTE – The definition of "effective field strength" in CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5] is equivalent to the **resultant magnetic field** or **resultant electric field**, as the case may be.

3.4.7

resultant magnetic field

magnetic field given by the expression

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4)$$

where B_x , B_y , and B_z are the r.m.s. values of the three orthogonal field components

The **resultant magnetic field** is also given by the expression

$$B_R = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} \quad (5)$$

where B_{\max} and B_{\min} are the r.m.s. values of the semi-major and semi-minor axes of the magnetic field ellipse, respectively. The resultant B_R is always $\geq B_{\max}$. If the magnetic field is linearly polarized, $B_{\min} = 0$ and $B_R = B_{\max}$. If the magnetic field is circularly polarized, $B_{\max} = B_{\min}$ and $B_R \approx 1,41 B_{\max}$.

NOTE – The definition of "effective field strength" in CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5] is equivalent to the **resultant magnetic field** or **resultant electric field**, as the case may be.

3.5 Measurements

3.5.1

correction factor

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

NOTE – Since the known error cannot be determined perfectly, the compensation cannot be complete.

3.5.2

coverage factor

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

NOTE – 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 percent of the distribution for a **coverage factor** $k = 1, 2,$ and $3,$ respectively.

3.5.3

scale factor

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

3.5.4

mesure ponctuelle (mesure en un point à un instant donné)

mesure effectuée à un instant donné et en un point donné dans l'espace, qui ne fournit pas d'informations sur les variations temporelles ou spatiales du champ

3.5.5

incertitude standard

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

3.5.6

incertitude de mesure

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

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

4 Symboles

a	= rayon de la sonde à bobine ; rayon d'une sonde de champ électrique sphérique
$2a, 2b$	= dimensions des côtés d'une bobine rectangulaire
B	= vecteur d'induction magnétique
B_f	= amplitude de l'induction magnétique (fréquence fondamentale)
B_j	= amplitude de l'induction magnétique à la $j^{\text{ème}}$ fréquence ($j = 1$ pour la fréquence fondamentale)
B_{RLj}	= niveau de référence CENELEC de l'induction magnétique à la $j^{\text{ème}}$ fréquence
B_0	= amplitude de champ magnétique alternatif
B_R	= champ magnétique résultant
B_z	= induction magnétique axiale
$B_{x,y,z}$	= valeurs efficaces des composantes orthogonales d'une induction magnétique
B_{\max}, B_{\min}	= valeurs efficaces du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse du champ magnétique
C	= capacité parasite d'une sonde à bobine
c_e	= coefficient électro-optique du cristal de Pockels
d	= espacement de plaques parallèles; distance par rapport à la source de champ électromagnétique
D	= vecteur de déplacement électrique
E	= champ électrique
E_i	= champ électrique à la $i^{\text{ème}}$ fréquence ($i = 1$ pour la fréquence fondamentale)
E_{RLi}	= niveau de référence CENELEC du champ électrique à la $i^{\text{ème}}$ fréquence
E_R	= champ électrique résultant
E_0	= champ électrique uniforme
E'	= champ électrique dans un cristal de Pockels
$E_{x,y,z}$	= valeurs efficaces des composantes orthogonales d'un champ électrique
E_{\max}, E_{\min}	= valeurs efficaces du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse d'un champ électrique

3.5.4**spot measurement (point-in-time measurement)**

measurement that is performed at some instant and point in space, that does not provide information regarding temporal or spatial variations of the field

3.5.5**standard uncertainty**

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

3.5.6**uncertainty of measurement**

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

NOTE – **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 characterized by experimental standard deviations. Estimates of other components can be based on experience or other information.

4 Symbols

a	= radius of coil probe ; radius of spherical electric field probe
$2a, 2b$	= side dimensions of rectangular coil
B	= magnetic flux density vector
B_f	= magnetic flux density (fundamental frequency)
B_j	= magnetic flux density at j th frequency ($j = 1$ for fundamental frequency)
B_{RLj}	= CENELEC magnetic flux density reference level at j th frequency
B_0	= amplitude of alternating magnetic field
B_R	= resultant magnetic field
B_z	= axial magnetic flux density
$B_{x,y,z}$	= r.m.s. values of orthogonal components of magnetic flux density
B_{\max}, B_{\min}	= r.m.s. values of semi-major and semi-minor axes of magnetic field ellipse
C	= stray capacitance of coil probe
c_e	= electro-optic coefficient of Pockels crystal
d	= spacing of parallel plates; distance from electromagnetic field source
D	= electric displacement vector
E	= electric field strength
E_i	= electric field at i th frequency ($i = 1$ for fundamental frequency)
E_{RLi}	= CENELEC electric field reference level at i th frequency
E_R	= resultant electric field
E_0	= uniform electric field strength
E'	= electric field in Pockels crystal
$E_{x,y,z}$	= r.m.s. values of orthogonal components of electric field
E_{\max}, E_{\min}	= r.m.s. values of semi-major and semi-minor axes of electric field ellipse

I	= courant circulant dans des bobines de champ magnétique
I_i	= flux lumineux incident (capteur de champ électro-optique)
I_t	= flux lumineux transmis (capteur de champ électro-optique)
l	= épaisseur d'un cristal de Pockels
L	= inductance d'une sonde à bobine
n	= indice de réfraction
N	= nombre de spires (système de bobine de champ magnétique)
Q	= charge induite
r	= distance entre une source de champ magnétique et un point de mesure; résistance d'une sonde à bobine et de conducteurs
R	= impédance d'entrée approximative d'un circuit détecteur (capteur de champ magnétique)
S	= surface d'électrode (capteur de champ électrique)
t	= temps
T	= période de signal périodique
V	= tension
$v(t)$	= signal électrique périodique
v_p	= tension fournie par la sonde à bobine
W	= rapport entre la tension v_p fournie et la tension V induite dans une sonde à bobine
Z	= impédance dans un circuit d'injection de courant
α_j	= fraction de la $j^{\text{ème}}$ harmonique dans un champ magnétique
$\Delta B_{\text{max}1}$	= la plus grande différence en pourcentage entre le champ magnétique au centre d'une sonde mono-axiale et le champ moyen maximum (moyenne sur la surface de la sonde), la sonde étant placée dans un champ créé par un dipôle magnétique
$\Delta B_{\text{max}3}$	= la plus grande différence en pourcentage entre le champ magnétique résultant moyen et le champ magnétique au centre d'une sonde tri-axiale, la sonde étant placée dans un champ créé par un dipôle magnétique
ϵ_0	= permittivité de l'espace libre
λ	= longueur d'onde de la lumière
μ_0	= perméabilité de l'espace libre
ϕ	= flux magnétique
ω	= pulsation de champ alternatif

5 Mesure des champs magnétiques alternatifs

5.1 Spécifications relatives aux instruments

Les divers types d'instruments disponibles pour caractériser des champs magnétiques quasi statiques sont décrits à l'article D.1. Les instruments doivent être accompagnés d'une quantité d'informations suffisante, y compris les spécifications relatives aux instruments et d'une notice d'instructions clairement rédigée pour permettre aux utilisateurs de déterminer la conformité aux prescriptions de la présente norme, pour les aider à faire fonctionner correctement le capteur de champ, et pour évaluer l'utilité du dispositif en vue d'une application par l'utilisateur.

I	= current to magnetic field coils
I_i	= incident light (electro-optic field meter)
I_t	= transmitted light (electro-optic field meter)
l	= Pockels crystal thickness
L	= inductance of coil probe
n	= index of refraction
N	= number of turns of wire (magnetic field coil system)
Q	= induced charge
r	= distance between magnetic field source and measurement location; resistance of coil probe and leads
R	= approximate input impedance of detector circuit (magnetic field meter)
S	= electrode surface area (electric field meter)
t	= time
T	= period of periodic signal
V	= voltage
$v(t)$	= periodic electrical signal
v_p	= coil probe voltage
W	= ratio of coil probe voltage to induced voltage
Z	= impedance in current injection circuit
α_j	= fraction of j th harmonic in magnetic field
$\Delta B_{\max 1}$	= largest difference in percentage between magnetic field at centre of single-axis probe and average field (across area of probe) at maximum reading in dipole magnetic field
$\Delta B_{\max 3}$	= largest difference in percentage between average resultant magnetic field and magnetic field at centre of three-axis probe in dipole magnetic field
ϵ_0	= permittivity of free space
λ	= wavelength of light
μ_0	= permeability of free space
ϕ	= magnetic flux
ω	= angular frequency of alternating field

5 Measurement of alternating magnetic fields

5.1 Instrumentation specifications

The various types of instrumentation available for characterizing quasi-static magnetic fields are described in D.1. Sufficient information shall be provided with the instrumentation, including instrument specifications and a clearly written instruction manual, to enable users to determine compliance with this standard, to aid them in the proper operation of the field meter, and to assess the usefulness of the device for the user's application. Complicated operating

Il convient d'éviter les procédures de fonctionnement compliquées. Les spécifications relatives aux instruments qu'il convient de fournir et /ou de satisfaire sont indiquées ci-après.

NOTE – Il est possible d'utiliser des instruments non conformes aux spécifications ci-après, si l'on est en mesure de démontrer que, dans les conditions où l'instrument est utilisé, il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus à l'aide de cet instrument et ceux obtenus à l'aide d'un capteur conforme à cette norme. Par exemple, il n'est possible d'utiliser un capteur muni d'un **détecteur de valeur redressée**, avec ou sans étage intégrateur, que si l'on est en mesure de démontrer que les harmoniques présentes dans le champ sont négligeables, et uniquement si l'instrument a été étalonné pour la fréquence fondamentale dans le champ.

5.1.1 Incertitude des instruments

Il est souhaitable que le système de mesure des champs magnétiques alternatifs indique la valeur efficace des champs magnétiques uniformes avec une incertitude inférieure à $\pm(10\%$ de la lecture + 20 nT) après avoir appliqué, si nécessaire, des **facteurs de correction**.

NOTE 1 – L'incertitude de l'instrument est déterminée à partir de plusieurs composantes, telles que l'incertitude d'étalonnage, la dérive de température des composants électroniques, la stabilité et les sources de bruit externes. L'incertitude ci-dessus est associée à la conception et au fonctionnement du **capteur d'induction magnétique** dans un champ presque uniforme. L'élément de 10 % se rapporte à l'incertitude, pendant l'étalonnage, sur toute la plage de fréquences (**bande passante**) spécifiée pour l'instrument et comprend des incertitudes dans la valeur de l'induction magnétique ainsi que des incertitudes supplémentaires, pendant le processus d'étalonnage (se reporter en 5.2.2). Le **facteur de couverture** est 2. L'inclusion de 20 nT prévoit des incertitudes liées aux instruments lors de l'étalonnage des échelles les plus sensibles et lors de mesures de champs de l'ordre de 0,1 μ T.

NOTE 2 – D'autres sources d'**incertitude de mesure** et des recommandations sur la manière de traiter les incertitudes sont respectivement données à l'article B.1 et en 5.3.

5.1.2 Plage d'amplitudes

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

5.1.3 Bande passante

L'instrument doit être accompagné de données ou de spécifications d'étalonnage permettant à l'utilisateur d'évaluer l'incertitude relative à la détermination des niveaux des champs lorsque l'instrument est utilisé dans des champs contenant différentes fréquences. Il est souhaitable que ces informations contiennent également la sensibilité de l'instrument à des fréquences au-delà de celles pour lesquelles il est prévu, par exemple les points à -3 dB. La **réponse en fréquence** de l'instrument doit être telle que l'exigence applicable à l'incertitude de l'instrument (voir 5.1.1) est remplie dans toute la plage de fréquences pour lequel il est prévu.

NOTE – L'incertitude admissible pour les instruments, associée à la **réponse en fréquence**, est augmentée à $\pm 20\%$ (**facteur de couverture** 2) pour des petits **dosimètres** individuels, dispositifs qui peuvent être portés à même le corps permettant d'enregistrer périodiquement le **champ magnétique résultant** à la fréquence industrielle et à ses harmoniques (voir article D.1).

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

Il est souhaitable que les plages de température et d'humidité relative, pour lesquelles l'instrument fonctionne dans les limites de l'incertitude spécifiée, ne soient pas inférieures aux plages comprises entre 0 °C et 45 °C et entre 5 % et 95 %, respectivement. Il est recommandé d'éviter des variations brutales de température susceptibles de produire de la condensation dans l'instrument (voir article B.1).

5.1.5 Alimentation en énergie

Si des piles (ou batteries) sont utilisées, il convient de prévoir un moyen pour indiquer si l'état de la pile permet un fonctionnement correct du capteur de champ. Il est souhaitable que les **dosimètres** individuels puissent fonctionner pendant au moins 8 h dans les limites de l'incertitude assignée, avant qu'il soit nécessaire de remplacer ou de recharger les piles. Si les piles utilisées sont rechargeables, il est recommandé de ne pas faire fonctionner les

procedures should be avoided. The instrument specifications that should be provided and/or satisfied are given below.

NOTE – Instruments not complying with the specifications below may be used if it can be demonstrated that, under the conditions the instrument is used, the results obtained will not differ significantly from those obtained with a meter which is in compliance with this standard. For example, a meter with a **rectified average detector** with or without an integrating stage may be used if it can be shown that the harmonics in the field are negligible, and if the instrument has been calibrated for the fundamental frequency in the field.

5.1.1 Instrumental uncertainty

The measuring system for alternating magnetic fields should indicate the r.m.s. value of uniform magnetic fields with an uncertainty of less than $\pm(10\%$ of reading +20 nT) after **correction factors** have been applied, if appropriate.

NOTE 1 – The uncertainty of the instrument is determined from several components such as the calibration uncertainty, temperature drift of the electronics, stability and external noise sources. The above uncertainty is associated with the design and functioning of the **magnetic flux density meter** in a nearly uniform field. The 10 % element refers to the uncertainty during calibration over the frequency range (**pass-band**) specified for the instrument and includes uncertainties in the value of the magnetic flux density and additional uncertainties during the calibration process (see 5.2.2). The **coverage factor** is 2. The inclusion of 20 nT anticipates instrumental uncertainties during the calibration of the most sensitive scales and when fields in the order of 0,1 μT are measured.

NOTE 2 – Other sources of **measurement uncertainty** and guidelines on the treatment of uncertainties are given in clause B.1 and 5.3, respectively.

5.1.2 Magnitude range

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

5.1.3 Pass-band

The instrument shall be provided with calibration data or specifications that enable the user to assess the uncertainty in determining field levels when using the instrument in fields containing different frequencies. This information should also include the sensitivity of the instrument to frequencies beyond the intended useful range, e.g. the -3 dB points. The **frequency response** of the instrument shall be such that the requirement of the instrumental uncertainty (see 5.1.1) is fulfilled over the frequency range for which it is intended.

NOTE – The permitted instrumental uncertainty associated with the **frequency response** is increased to $\pm 20\%$ (**coverage factor** 2) for small personal **exposure meters**, devices that can be worn, and which periodically record the power frequency and power frequency harmonic **resultant magnetic field** (see clause D.1).

5.1.4 Operating temperature and humidity ranges

The temperature and relative humidity ranges over which the instrument operates within the specified uncertainty should be no less than 0 °C to 45 °C and 5 % to 95 %, respectively. Sudden temperature changes that can lead to condensation in the instrument should be avoided (see clause B.1).

5.1.5 Power supplies

If batteries are used, provision should be made to indicate whether the battery condition is adequate for proper operation of the field meter. Instruments used to record personal exposure should be capable of at least 8 h operation within their rated uncertainty before replacement or recharging of the batteries becomes necessary. If rechargeable batteries are used, it is recommended that the instrumentation is not operated while connected to the mains voltage.

instruments alors qu'ils sont reliés à l'alimentation du réseau. Lorsque de tels raccordements sont nécessaires, il convient de démontrer que les champs parasites provenant du chargeur de pile, les perturbations conduites provenant de la tension du réseau, et les couplages électromagnétiques établis par l'intermédiaire des conducteurs de raccordement (au chargeur de pile) n'affectent pas la mesure (voir 5.1.8).

NOTE – Si les piles utilisées dans les **dosimètres** sont des piles à enveloppes ferromagnétiques, il est nécessaire de veiller à ce que les enveloppes n'influencent pas de façon significative les lectures faites par l'instrument (voir article B.1).

5.1.6 Lisibilité des échelles de graduation

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

NOTE – Pour que des instruments, commercialisés avant la publication de la présente norme et n'indiquant pas les unités, soient conformes à la présente norme, il est souhaitable que ces instruments soient munis d'une étiquette adéquate indiquant les unités. Pour cela, l'utilisateur peut appliquer une étiquette au corps du capteur de champ. En variante, l'utilisateur peut appliquer une étiquette fournie par le fabricant.

5.1.7 Dimensions des instruments

Il convient de prévoir des dimensions adéquates pour l'enveloppe contenant le circuit détecteur et d'éventuels câbles de liaison. Il est souhaitable que la taille des sondes ou parties sensibles soit adaptée à la variation spatiale du champ mesuré (voir article B.1). Il est préférable que les parties sensibles aient une surface égale ou inférieure à 0,01 m². Avec des instruments tri-axiaux, les trois parties sensibles peuvent être concentriques (c'est-à-dire des **sondes à bobine** ayant un point central commun) ou, si la taille des parties sensibles est inférieure à 0,05 m, il convient de les placer aussi près que possible les unes des autres (voir article B.1). Il est souhaitable que la dimension maximale du volume contenant les trois **bobines** associées ne soit pas supérieure à 0,2 m. Il est souhaitable que les **sondes à bobine** aient une section transversale circulaire ou carrée; des petits écarts par rapport à ces formes, comme par exemple lorsque des **bobines** concentriques se croisent entre elles, sont admis.

Il est souhaitable que les emplacements et les orientations des sondes contenues dans les boîtiers des capteurs de champ magnétique soient clairement indiqués sur l'instrument ou dans la notice d'utilisation.

5.1.8 Compatibilité électromagnétique

5.1.8.1 Immunité

a) Champ électrique à fréquence industrielle

Il est souhaitable que des instruments, destinés à être utilisés au voisinage d'équipements sous haute tension fonctionnant à des fréquences industrielles, ne soient pas affectés de manière significative par des champs électriques ambiants pouvant atteindre 20 kV/m, c'est-à-dire qu'il est souhaitable que l'influence du champ électrique sur la lecture du champ magnétique soit inférieure à 20 nT. Il est possible que cette valeur requise d'immunité soit augmentée pour certains environnements extrêmes dans lesquels il peut y avoir des champs électriques atteignant 100 kV/m, par exemple à proximité des conducteurs de lignes de transmission sous haute tension.

NOTE 1 – Les essais relatifs à l'immunité aux champs électriques à fréquences industrielles peuvent être effectués à l'aide des systèmes de plaques parallèles décrits à l'article A.2.

NOTE 2 – L'effet de proximité de l'utilisateur de l'instrument (voir article B.2) peut atténuer ou accentuer le champ électrique, selon la géométrie du champ et la position du capteur de champ magnétique par rapport à l'utilisateur.

When such connections are necessary, it should be demonstrated that stray fields from the battery charger, conducted disturbances from the mains voltage, and electromagnetic coupling via the connecting leads (to the battery charger) do not affect the measurement (see 5.1.8).

NOTE – If batteries with ferromagnetic jackets are used in **exposure meters**, care must be exercised that the jackets do not significantly influence readings by the instrument (see clause B.1).

5.1.6 Readability of scale

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

NOTE – To comply with this standard, instrumentation marketed prior to the issue of this standard, which does not indicate the units, should be provided with an appropriate label indicating the units. This may be accomplished by the user applying a label to the body of the field meter. Alternatively, a label provided by the manufacturer to the user may be applied by the user.

5.1.7 Instrument dimensions

The dimensions of the enclosure containing the detector circuit and any connecting cables should be provided. The size of the probes or sensing elements should be appropriate to the spatial variation of the field measured (see clause B.1). The sensing elements should be of area 0,01 m², or smaller. With three-axis instruments, the three sensing elements may be concentric (i.e. **coil probes** that have a common central point) or, if the sensing elements are no larger than 0,05 m, they should be as close together as possible (see clause B.1). The maximum dimension of the volume containing the three **coil probes** combined should not exceed 0,2 m. **Coil probes** should be either circular or square in cross-section; small deviations from these shapes, for example where concentric coils cross each other, are permitted.

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

5.1.8 Electromagnetic compatibility

5.1.8.1 Immunity

a) Power frequency electric field

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

NOTE 1 – Tests for immunity to power frequency electric fields may be performed using the parallel plates systems described in clause A.2.

NOTE 2 – The proximity effect of the instrument user (see clause B.2) can shield or enhance the electric field, depending on the geometry of the field and the location of the magnetic field meter relative to the user.

b) Champs électromagnétiques rayonnés

Le fonctionnement des instruments ne doit pas être affecté par un rayonnement électromagnétique compris entre 80 MHz et 1 GHz pour un niveau de champ électrique de 3 V/m efficaces. Il convient d'effectuer les essais relatifs aux instruments conformément aux méthodes décrites dans la CEI 61000-4-3.

Le fonctionnement des instruments ne doit pas être affecté par un rayonnement électromagnétique compris entre 150 kHz et 80 MHz. Il convient d'effectuer les essais conformément aux méthodes décrites dans la CEI 61000-4-6 à une tension de 3 V efficaces. Il est souhaitable que les instruments continuent à fonctionner normalement au cours des deux essais décrits ci-dessus.

NOTE 1 – Il n'est pas nécessaire de soumettre aux essais décrits dans la CEI 61000-4-6 les équipements qui fonctionnent avec des piles (dimension $< \lambda/4$), qui n'ont aucune liaison avec la terre ni avec aucun autre équipement (non isolé) et qui ne seront pas utilisés pendant le chargement des piles.

NOTE 2 – Il est important de réaliser les tests d'immunité sur toute la plage de fréquence de 26 MHz à 1 GHz. La fréquence limite basse est importante car il existe une forte probabilité que l'instrument soit soumis à des champs dans la bande des 27 MHz (Citizen's band)

NOTE 3 – Il peut être nécessaire d'augmenter les valeurs requises d'immunité dans certaines conditions, par exemple lorsqu'on effectue des mesures à proximité d'antennes de radiodiffusion et de téléphones mobiles (voir article B.1, tableau B.2).

c) Immunité aux transitoires

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

d) Décharges électrostatiques (DES)

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

5.1.8.2 Emission

a) Emission harmonique

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

b) Perturbations conduites – 0,15 MHz à 30 MHz (instruments reliés au réseau)

Il est possible de caractériser les limites relatives aux tensions perturbatrices aux bornes d'alimentation du réseau en utilisant des détecteurs de quasi-crêtes ou des détecteurs de valeurs moyennes; ces limites sont données ci-après en fonction de la fréquence (voir CISPR 11, classe B).

Tableau 1 – Limites des tensions perturbatrices aux bornes du réseau

Bande de fréquences MHz	Quasi-crête dB(μV)	Valeur moyenne dB(μV)
0,15 – 0,50	66 Décroit jusqu'à 56 en même temps que le logarithme de la fréquence	56 Décroit jusqu'à 46 en même temps que le logarithme de la fréquence
0,50 – 5	56	46
5 – 30	60	50

b) Radiated electromagnetic fields

The operation of instrumentation shall not be affected by electromagnetic radiation between 80 MHz and 1 GHz for an electric field level of 3 V/m r.m.s. Testing of instrumentation should be in accord with the methods described in IEC 61000-4-3.

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

NOTE 1 – Battery-powered equipment (dimension $<\lambda/4$) which has no connection(s) to the ground nor to any other (non-insulated) equipment, and which will not be used during battery charging, does not need to be tested according to IEC 61000-4-6.

NOTE 2 – It is important to perform the radiated immunity tests over the entire frequency range from 26 MHz to 1 GHz. The lower frequency boundary is important because of the high probability that the instruments will experience radiation in the 27 MHz citizen's band.

NOTE 3 – The immunity requirements may need to be increased under certain conditions, e.g. during measurements near radio-broadcasting antennas and mobile telephones (see clause B.1, table B.2).

c) Immunity to transients

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

d) Electrostatic discharge (ESD)

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

5.1.8.2 Emissions

a) Harmonic emissions

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

b) Conducted disturbances – 0,15 MHz to 30 MHz (instrumentation connected to mains)

The limits for mains terminal disturbance voltages may be characterized using quasi-peak or average detectors and are given below as a function of frequency (see CISPR 11, class B).

Table 1 – Mains terminal disturbance voltage limits

Frequency band MHz	Quasi-peak dB(μ V)	Average dB(μ V)
0,15 – 0,50	66 Decreasing with logarithm of frequency to 56	56 Decreasing with logarithm of frequency to 46
0,50 – 5	56	46
5 – 30	60	50

Il convient d'effectuer les essais relatifs aux instruments en procédant conformément aux méthodes décrites dans le CISPR 11.

c) Perturbations rayonnées – 30 MHz à 1 000 MHz

Les émissions électromagnétiques provenant d'instruments contenant des dispositifs fonctionnant à des fréquences de 9 kHz ou plus doivent être limitées aux valeurs ci-après (voir CISPR 11, classe B).

30 dB ($\mu\text{V/m}$) à 10 m 30 MHz à 230 MHz

37 dB ($\mu\text{V/m}$) à 10 m 230 MHz à 1 000 MHz

Il convient d'effectuer les essais relatifs aux instruments en procédant conformément aux méthodes décrites dans le CISPR 11.

NOTE – Les prescriptions d'essai ci-dessus proviennent du CISPR 11 et sont sujettes à révision. Il convient d'effectuer les essais conformément à l'édition la plus récente de cette norme.

5.1.9 Facteur de crête

Il est souhaitable que le système mesure correctement la valeur efficace vraie du champ, même lorsque le **facteur de crête** du champ magnétique est 3 (voir article B.1).

NOTE – Dans la pratique, de nombreux champs présentent un **facteur de crête** élevé et la présence d'un **facteur de crête** élevé peut entraîner une saturation indésirable dans les étages amplificateurs du détecteur.

5.1.10 Robustesse

Il est souhaitable que le capteur et autres composants du système soient suffisamment robustes pour supporter les vibrations et les chocs subis lors du transport. L'utilisation d'une mallette de transport est souhaitable.

5.1.11 Poids

Le poids des instruments doit être étudié. Il est souhaitable que le poids des instruments portatifs soit maintenu aussi faible que possible pour permettre l'utilisation manuelle des instruments dans des conditions limites, par exemple dans certains environnements industriels.

5.2 Etalonnage

5.2.1 Généralités

Les systèmes de mesure doivent être soumis à des étalonnages et à des vérifications de leur étalonnage pendant toute leur durée de vie. Les essais d'étalonnage mentionnés dans la présente norme sont des **essais de type** et des **essais de réception**. Les **essais de type** sont normalement effectués par le fabricant sur un ou plusieurs dispositifs. Les **essais de réception** sont normalement effectués une seule fois par le fabricant sur chaque capteur de champ. Il est nécessaire de répéter les **essais de réception** si le capteur de champ a fait l'objet de modifications ou de réparations importantes. Les essais de vérification sont effectués périodiquement pendant l'utilisation de l'instrument (voir 5.2.4). Il convient d'assurer la traçabilité de tous les étalonnages effectués à partir des étalons nationaux et internationaux via une chaîne ininterrompue d'étalonnages, tous ayant des incertitudes spécifiées.

Ces trois méthodes d'étalonnage suivantes sont couvertes par la présente norme:

- a) étalonnage par introduction de la sonde du capteur de champ dans un champ magnétique calculé (après avoir mesuré les dimensions des bobines et l'intensité du courant circulant dans les bobines);
- b) étalonnage utilisant une technique d'injection de tension, et
- c) étalonnage par comparaison avec un système de mesure de référence (voir article A.1).

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

c) Radiated disturbances – 30 MHz to 1 000 MHz

The electromagnetic emissions from instrumentation containing devices operating at frequencies of 9 kHz or higher shall be limited to the values listed below (see CISPR 11, class B).

30 dB ($\mu\text{V/m}$) at 10 m 30 MHz to 230 MHz

37 dB ($\mu\text{V/m}$) at 10 m 230 MHz to 1 000 MHz

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

NOTE – The above test requirements have been taken from CISPR 11 and are subject to revision. Tests should be conducted according to the most recent edition of that standard.

5.1.9 Crest factor

The measuring system should measure correctly the true r.m.s. value of the field, even when the **crest factor** of the magnetic field is 3 (see clause B.1).

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

5.1.10 Durability

The indicating meter and other system components should be rugged enough to withstand vibration and shock resulting from transport. A carrying case is desirable.

5.1.11 Weight

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

5.2 Calibration

5.2.1 General

Measurement systems are required to undergo calibration and verification of their calibration throughout their service life. The calibration tests referred to in this standard are **type tests** and **acceptance tests**. **Type tests** are normally performed by the manufacturer on one or more devices. **Acceptance tests** are normally performed only once by the manufacturer on each field meter. **Acceptance tests** need to be repeated if major changes or repairs of the instrument have been made. Verification tests are performed at time intervals during use of the instrument (see 5.2.4). All calibrations should be traceable to national and international standards through an unbroken chain of calibrations, all having stated uncertainties.

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

- a) calibration by introduction of the field meter probe into a calculated magnetic field (following measurements of coil dimensions and current to the coil system);
- b) calibration using a voltage injection technique, and
- c) calibration by comparison with a reference measurement system (see clause A.1).

5.2.2 Procédure d'étalonnage

Les étalonnages sont prescrits comme faisant partie des **essais de type**, des **essais de réception** (voir 5.2.1), et des essais de vérification périodique (voir 5.2.4). Il convient de suivre, selon le cas approprié, les procédures de la présente section. Pendant l'étalonnage des plages d'amplitudes plus élevées (c'est-à-dire des plages qui ne sont pas influencées de façon significative par les champs magnétiques parasites), il convient de placer la sonde dans un champ presque uniforme généré par un système de **bobines** (voir article A.1). Il est souhaitable que l'axe de la sonde coïncide avec l'axe du système de **bobines** et que le plus grand écart de champ par rapport à la valeur centrale soit inférieur à 1 % sur toute la section transversale de la sonde.

NOTE 1 – Des informations concernant des champs générés par des systèmes de boucles rectangulaires, carrées et circulaires (y compris des **bobines** de Helmholtz) sont données en [17], [35], [56], [69] et A.1. Par exemple l'induction magnétique produite par une seule boucle carrée (composée de plusieurs tours de fil) de 1 m × 1 m remplira la condition d'uniformité pour une sonde ayant un diamètre de 0,10 m (voir article A.1). Il est possible d'augmenter ou de réduire la taille de la boucle respectivement pour des sondes de plus grandes dimensions ou des sondes de plus faibles dimensions, afin de maintenir le niveau d'uniformité indiqué à travers la sonde. Il est également possible de procéder à l'étalonnage en utilisant la technique d'injection de tension ou en comparant les résultats obtenus avec ceux d'un capteur de champ magnétique de référence (voir article A.1).

NOTE 2 – Il est possible de déroger à l'exigence concernant l'uniformité du champ pendant l'opération d'étalonnage, pour des sondes utilisées pour déterminer des valeurs moyennes de champs non uniformes et/ou pour des applications dans lesquelles les exigences relatives à la résolution spatiale ne sont pas considérées comme très importantes. Dans ce cas, il est souhaitable que le plus grand écart du champ étalon par rapport à la valeur centrale soit $\leq 1,5$ % sur toute la section transversale de la sonde. Par exemple, le champ produit par une boucle carrée de 1,3 m × 1,3 m répondra à cette exigence d'uniformité pour une sonde ayant un diamètre de 0,20 m.

Il convient de procéder aux étalonnages des capteurs mono-axiaux et de chacun des trois axes des capteurs de champ tri-axiaux en utilisant des champs magnétiques sinusoïdaux ou leurs tensions équivalentes (technique d'injection de tension), aux niveaux et aux fréquences indiqués par les spécifications des instruments.

Il est souhaitable que l'induction magnétique dans le système de **bobines** soit connue avec une incertitude inférieure à ± 3 % (**facteur de couverture** 1). L'amplitude peut être déterminée par un calcul effectué à partir des mesures des dimensions des **bobines**, du nombre de spires dans la ou les **bobines**, et de l'intensité du courant dans les **bobines** (voir article A.1), ou par mesure directe en utilisant un **capteur d'induction magnétique** de référence avec une **incertitude de mesure** suffisamment faible. Si la technique d'injection de tension est utilisée en tant que partie intégrante de la procédure d'étalonnage (voir article A.1, selon le modèle de l'instrument, il se peut que cela ne soit possible que pendant les **essais de type**), l'induction magnétique équivalente est déterminée par la tension injectée.

L'incertitude de l'étalonnage sera déterminée par des facteurs tels que l'incertitude dans la valeur de l'induction magnétique dans le système d'étalonnage (± 3 %; voir article A.1), ou l'incertitude dans la tension injectée, la résolution dans la lecture de l'instrument soumis à l'essai, et la variation de la lecture si l'instrument soumis à l'essai est placé à plusieurs reprises dans le système d'étalonnage. D'autres facteurs tels que des champs magnétiques parasites ambiants peuvent aussi compromettre l'incertitude de l'étalonnage. Il est souhaitable que l'incertitude totale du procédé d'étalonnage (**facteur de couverture** 1) ne soit pas supérieure à $\pm(5\% + 10\text{ nT})$. Il convient d'utiliser un **facteur de couverture** de 2 lors de la spécification de l'incertitude des instruments, c'est-à-dire que, dans ce cas, l'incertitude des instruments devrait être $\leq \pm(10\% + 20\text{ nT})$. Il convient d'assurer la traçabilité de l'étalonnage par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux. Des recommandations sur la manière de traiter toutes les incertitudes et une liste de sources d'incertitude sont respectivement en 5.3 et à l'article B.1.

En ce qui concerne les instruments munis d'un dispositif d'affichage analogique, il convient d'enregistrer au moins trois niveaux de champ magnétique pour chaque plage du capteur de champ, ces trois niveaux devant suffire à couvrir de 30 % à 90 % de la pleine échelle. Pour les capteurs munis d'un dispositif d'affichage numérique, il convient d'obtenir au moins quatre

5.2.2 Calibration procedure

Calibrations are required as part of **type tests**, **acceptance tests** (see 5.2.1), and periodic verification tests (see 5.2.4). The procedures of this section should be followed, as appropriate, in all cases. For calibration of the higher magnitude ranges (i.e. ranges not significantly influenced by background magnetic fields), the magnetic field probe should be placed in a nearly uniform field produced by a coil system (see clause A.1). The probe axis should coincide with the axis of the coil system and the largest departure of the field from the central value should be less than 1 % over the cross-sectional area of the probe.

NOTE 1 – Information on fields generated by rectangular, square, and circular loop systems (including Helmholtz coils) is given in [17], [35], [56], [69] and A.1. For example, the magnetic flux density produced by a single square loop (of many turns of wire) 1 m × 1 m will satisfy the uniformity requirement for a probe with a 0,10 m diameter (see clause A.1). The loop size may be scaled upwards or downwards for larger or smaller probes, respectively, to maintain the indicated level of uniformity across the probe. The calibration may also be performed using the voltage injection technique or by comparison with a reference magnetic field meter (see clause A.1).

NOTE 2 – The field uniformity requirement during calibration may be relaxed for large probes that are used for determining average values of non-uniform fields and, or for applications where spatial resolution requirements are not considered important. In this case, the largest departure of the calibration field from the central value should be ≤1,5 % over the cross-sectional area of the probe. For example, the field produced by a square loop 1,3 m × 1,3 m will satisfy this uniformity requirement for a probe with a 0,20 m diameter.

Calibrations of single-axis field meters and each axis of three-axis field meters should be performed with sinusoidal magnetic fields or their equivalent voltages (voltage injection technique) at the levels and frequencies indicated by the instrument specifications.

The magnetic flux density in the coil system should be known with an uncertainty of less than ±3 % (**coverage factor 1**). The magnitude may be determined by calculation based on measurements of the coil dimensions, the number of turns in the coil(s), and the current in the coils (see clause A.1), or by direct measurement with a calibrated reference **magnetic flux density meter** with sufficiently low **measurement uncertainty**. If the voltage injection technique is used as part of the calibration (see clause A.1, depending on instrument design, this may only be possible during **type tests**), the equivalent magnetic flux density is determined by the injected voltage.

The uncertainty of the calibration will be determined by such factors as the uncertainty in the value of the magnetic flux density in the calibration system (±3 %; see clause A.1) or the uncertainty in the injected voltage, the resolution in the reading of the instrument under test, and the variation of the reading if the instrument under test is repeatedly placed into the calibration system. Other factors such as ambient background magnetic fields may further compromise the uncertainty of the calibration. The overall uncertainty of the calibration process (**coverage factor 1**) should be no greater than ±(5 % + 10 nT). A **coverage factor** of 2 should be used when specifying instrumental uncertainty, i.e. the instrumental uncertainty would be in this case ≤ ±(10 % + 20 nT). The calibration should be traceable to national and/or international standards. Guidelines on the treatment of all uncertainties and a listing of the sources of uncertainty are given in 5.3 and clause B.1, respectively.

At least three magnetic field levels for each range of the field meter, sufficient to span 30 % to 90 % of the full scale, should be recorded for meters with analogue displays. At least four points, sufficient to span 10 % to 90 % of the full scale, should be obtained with field meters with digital displays. Field meters with auto-ranging capabilities should be calibrated on each

points suffisants pour couvrir de 10 % à 90 % de la pleine échelle. En ce qui concerne les instruments à sélection automatique du calibre, il convient de les étalonner sur chaque plage de mesure, en au moins trois points représentatifs qui couvrent la majeure partie de la plage. Sur la plage la plus sensible, il est souhaitable que l'un des points d'étalonnage se situe à environ 10 % de la valeur maximale *pour cette plage*. Sur la plage la moins sensible, il est souhaitable que l'un des points d'étalonnage se situe à 90 % de la valeur maximale *pour cette plage*. Pour au moins un niveau de champ magnétique, il convient d'effectuer les étalonnages à trois fréquences qui couvrent la **bande passante**, c'est-à-dire à la fréquence la plus élevée, à la fréquence la plus faible, et à une fréquence intermédiaire.

Lors de l'étalonnage de chaque axe de sondes tri-axiales, il convient de vérifier l'orthogonalité des axes entre eux ainsi que la **diaphonie** entre les circuits du détecteur de chaque sonde. Il est souhaitable que la configuration de la sonde tri-axiale et du champ magnétique soit telle que l'axe de chaque sonde est aligné avec la direction du champ magnétique. Pour chaque alignement des sondes, il convient de mesurer la valeur fournie par les deux sondes restantes et cette valeur doit normalement être inférieure à 3 % du signal provenant de la sonde alignée. Il n'est besoin d'effectuer ce contrôle de l'orthogonalité des **bobines** qu'à un seul niveau de champ. Il convient également de contrôler l'étalonnage des capteurs de champ magnétique à l'aide de sondes tri-axiales pour une orientation (à une fréquence et à un niveau de champ) lorsque toutes les **bobines** sont traversées par pratiquement le même flux.

Pendant les **essais de type**, il convient de déterminer le bruit de fond (voir article B.1) pour chaque échelle en cours d'étalonnage. Si l'amplitude du bruit de fond est significative, il convient de la réduire ou de la combiner avec d'autres sources d'incertitudes liées à l'instrument. Il convient d'effectuer cette opération pour les capteurs de champ mono-axiaux et pour chaque axe des capteurs de champ tri-axiaux.

Il est souhaitable que la fréquence de résonance de la boucle d'étalonnage soit largement supérieures aux fréquences d'étalonnage afin que les étalonnages ne soient pas affectés par le phénomène de résonance (voir article A.1).

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

Il est souhaitable que le courant traversant les **bobines** d'étalonnage soit pratiquement exempt de composantes harmoniques (<1 %).

5.2.3 Documentation relative aux essais

Il est souhaitable que les fabricants de capteurs de champ fournissent des documents contenant les résultats d'essai et, en plus des données relatives aux spécifications des instruments (voir 5.1.1 à 5.1.11), les renseignements suivants:

- identification de l'appareillage d'essai;
- identification du client;
- identification du modèle d'instrument et de son numéro de série;
- un numéro unique de rapport d'essai;
- la ou les dates de l'essai ou des essais;
- identification de la ou des personnes acceptant la responsabilité technique concernant le rapport d'essai.

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

range at no less than three representative points which span most of the range. On the most sensitive range, one of the calibration points should be near 10 % of the maximum value *for that range*. On the least sensitive scale, one of the calibration points should be 90 % of the maximum value *for that range*. For at least one magnetic field level, calibrations should be performed at three frequencies which span the **pass-band**, i.e. at the highest and lowest frequencies, and one intermediate frequency.

When calibrating each axis of three-axis probes, checks for the orthogonality of the probes as well as for **crosstalk** between the detector circuitry for each probe should be made. The three-axis probe and magnetic field should be configured so that the axis of each probe can be aligned with the magnetic field direction in succession. For each alignment of the probes, the output from the remaining two probes should be measured and should be less than 3 % of the signal from the aligned probe. This examination for orthogonality of the **coil probes** need be performed at only one field level. The calibration of magnetic field meters with three-axis probes should also be checked for one orientation (at one frequency and field level) where approximately the same flux passes through all the coils.

During **type tests**, the noise floor (see clause B.1) should be determined for each scale that is being calibrated. If significant in magnitude, it should be reduced or combined with other sources of instrument uncertainty. This should be done for single-axis field meters and each axis of three-axis field meters.

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

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

The current to the calibration coils should be nearly free (<1 %) of harmonic content.

5.2.3 Test documentation

Manufacturers of field meters should document the results of tests and provide, in addition to the data for the instrument specifications (see 5.1.1 to 5.1.11), the following information:

- identification of the test facility;
- identification of the client;
- identification of the instrument model and serial number;
- a unique test report number;
- the date(s) of the test(s);
- identification of (the) person(s) accepting technical responsibility for the test report.

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

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

Il convient de tenir ces renseignements à la disposition des clients sur simple demande de leur part. En ce qui concerne les instruments destinés à être utilisés dans des situations litigieuses, il est recommandé de vérifier l'étalonnage des instruments pour la plage d'amplitudes et pour la plage de fréquences concernées, en utilisant un autre appareillage d'étalonnage.

Il est souhaitable que les laboratoires d'essai soient également conformes aux prescriptions ci-dessus, selon le cas applicable. Les opérateurs manipulant les appareils d'étalonnage sont invités à utiliser un système qualité conforme au Guide 25 de l'ISO [31].

5.2.4 Essais de vérification

Dans la mesure du possible, il est souhaitable que les utilisateurs des instruments analysent la réponse de leurs capteurs de champ en utilisant la technique d'injection de tension, quand le capteur est étalonné dans un champ connu ou peu de temps après. Cette pratique devrait permettre d'utiliser la technique d'injection de tension comme un moyen de vérification d'étalonnage lorsque l'on ne dispose pas de systèmes de **bobines**.

Il existe une autre méthode pour vérifier périodiquement l'étalonnage d'un capteur de champ à une fréquence donnée; cette méthode consiste à analyser la réponse du capteur pour les différentes échelles lorsqu'il est placé dans un champ magnétique qui peut être fidèlement reproduit à l'aide d'un système de **bobines** de dimensions convenables. Cette méthode suppose que la géométrie du système de **bobines**/des sondes reste inchangée et que les niveaux de champs magnétiques parasites ne sont pas significatifs.

Il n'est pas nécessaire que les vérifications de l'étalonnage par l'utilisateur des instruments soient aussi exhaustives que les **essais de réception**. Par exemple, à la fréquence qui convient pour l'application de mesure, il suffira d'effectuer des vérifications en un ou deux points pour chaque plage du capteur de champ qui sera utilisé pour les mesures, afin de vérifier le **facteur d'échelle**.

NOTE – Il est recommandé que l'un des points d'essai se situe dans la moitié supérieure d'une plage donnée.

Il convient de documenter les résultats des essais de vérification et de les tenir à disposition. Il est souhaitable que les documents indiquent la date des essais et le nom de la personne ou des personnes qui ont effectué les essais.

Il convient de procéder, à intervalles réguliers, à la vérification de l'étalonnage sur les plages d'amplitudes que l'on compte utiliser. Un intervalle initial de douze mois est suggéré. Cet intervalle peut être modifié en fonction de la dérive de la réponse du capteur de champ entre deux vérifications. Il convient également d'envisager des vérifications avant et après de longues périodes d'utilisation du capteur de champ, par exemple si des mesures sont effectuées sur une période allant de quelques jours à une semaine. Cette pratique revêt une importance particulière lorsqu'il est difficile d'un point de vue logistique de se rendre ultérieurement aux endroits où les mesures ont été effectuées.

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

This information should be made available to clients upon request. As regards instrumentation intended for use in situations where litigation is anticipated, it is recommended that the instrument calibration be verified for the relevant magnitude range and frequency range by a second independent facility.

Testing laboratories should also comply with the above requirements, as applicable. Operators of calibration facilities are encouraged to use a quality system that conforms to ISO Guide 25 [31].

5.2.4 Verification tests

When possible, it is desirable for instrument users to examine the response of their field meters using the voltage injection technique at the time when the meter is calibrated in a known field or shortly thereafter. This practice would enable the use of the voltage injection technique as a means of verifying the calibration when a coil systems is not available.

A second approach to the periodic verification of the field meter calibration at a given frequency is to examine its response for the different scales when placed in a magnetic field that can be faithfully reproduced using a coil system of convenient size. This approach assumes that the coil system/probe geometry remains the same and background magnetic field levels are not significant.

Verifications of the calibration by the instrument user need not be as exhaustive as **acceptance tests**. For example, at frequencies relevant to the measurement application, checks at one or two points for each range of the field meter that will be used for measurements will be adequate for verifying the **scale factor**.

NOTE – It is recommended that one test point be in the upper half of a given range.

The results of verification tests should be documented and readily accessible. The documentation should include the date of the tests and identification of the person(s) performing the tests.

Verification of the calibration on the magnitude ranges intended for use should be performed at regular intervals. An initial interval of twelve months is suggested. This interval may be altered depending on the drift of the field meter response between verifications. Verifications should also be considered prior to and after extended periods of field meter use, e.g. if measurements are performed over a period of several days to a week. This practice is particularly important when there are logistical difficulties in returning to the measurement location at a later time.

5.3 Incertitude de mesure

Afin de déterminer l'incertitude totale associée aux valeurs efficaces mesurées de l'induction magnétique dans différents environnements de mesure, il convient de tenir raisonnablement compte des diverses sources d'incertitude. Les sources d'incertitude suivantes figurent parmi les sources potentielles d'incertitude identifiées en 5.2 et à l'article B.1:

- incertitude de l'étalonnage;
- effets de moyennage des **bobines** pendant les mesures de champs non uniformes (voir tableau B.1);
- erreurs de positionnement de la sonde dans des champs non uniformes;
- limitations de la **réponse en fréquence** ou de la **bande passante**;
- blindage inadéquat du champ électrique;
- bruit de fond;
- orthogonalité des **bobines** tri-axiales;
- **diaphonie**;
- constante de temps de l'instrument;
- température.

Certaines sources d'incertitude peuvent être réduites à des niveaux négligeables. Par exemple, un blindage correct permet de réduire, à un niveau négligeable, la sensibilité aux champs électriques à la fréquence industrielle et aux perturbations électromagnétiques [24]. De la même manière, il est possible d'utiliser des supports réalisés en matériaux isolants pour assurer un positionnement précis de la sonde dans des champs particulièrement non uniformes.

NOTE – Il peut y avoir des environnements de mesure extrêmes pour lesquels il sera difficile d'assurer une protection adéquate contre les perturbations électromagnétiques, par exemple à proximité d'installations de radiodiffusion à très haute fréquence (VHF) et à ultra haute fréquence (UHF).

Il convient d'appliquer des **facteurs de correction** connus (voir article A.1) aux lectures obtenues avec des **capteurs d'induction magnétique**. Si l'application de **facteurs de correction** n'est pas possible, il convient de traiter l'influence des **facteurs de correction** comme une **incertitude de mesure** ajoutée.

Il convient de faire preuve de discernement lors du calcul de l'incertitude. Si, par exemple, un champ magnétique contient des harmoniques, la valeur efficace vraie de l'induction magnétique est donnée par:

$$B = B_f \sqrt{1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \dots} \quad (6)$$

où

B_f est la valeur efficace de la composante du champ à la fréquence fondamentale;

α_j est la contribution de la $j^{\text{ème}}$ harmonique.

Si l'amplitude des harmoniques décroît à des fréquences plus élevées et si la **bande passante** du capteur de champ est inadéquate pour donner la valeur totale des harmoniques élevées, la valeur efficace vraie de l'induction magnétique peut encore ne pas être trop affectée par la **réponse en fréquence** limitée en raison de la somme donnée dans l'équation (6).

De la même manière, il convient de reconnaître que des incertitudes, apparaissant pendant la mesure de champs magnétiques produits par d'autres appareils ou des équipements électriques, en fonction de la distance par rapport à la source, peuvent prendre des valeurs

5.3 Measurement uncertainty

In order to determine the total uncertainty associated with r.m.s. measurements of the magnetic flux density in different measurement environments, there should be an appropriate accounting of the various sources of uncertainty. Possible sources of uncertainty identified in 5.2 and B.1 are as follows:

- calibration uncertainty;
- averaging effects of **coil probes** during non-uniform field measurements (see table B.1);
- errors in positioning the probe in non-uniform fields;
- **frequency response** or **pass-band** limitations;
- inadequate electric field shielding;
- the noise floor;
- orthogonality of three-axis coils;
- **crosstalk**;
- instrument time constant;
- temperature .

Some sources of uncertainty can be reduced to negligible levels. For example, proper shielding can reduce susceptibility to power frequency electric fields and electromagnetic interference to negligible levels [24]. Similarly, stands fabricated from insulating materials may be used for precise positioning of the field meter probe in highly non-uniform fields.

NOTE – There can be extreme measurement environments for which adequate shielding against electromagnetic interference will be difficult, e.g. near very high-frequency (VHF) and ultra-high (UHF) broadcast facilities.

Known **correction factors** (see clause A.1) should be applied to readings obtained with **magnetic flux density meters**. If it is impractical to apply **correction factors**, the influence of the **correction factors** should be treated as an added **measurement uncertainty**.

Some judgement is called for when performing the uncertainty calculation. If, for example, a magnetic field contains harmonics, the true r.m.s. value of the magnetic flux density is given by

$$B = B_f \sqrt{1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \dots} \quad (6)$$

where

B_f is the r.m.s. value of the fundamental field component;

α_j is the fraction of the i th harmonic.

If the harmonics decrease in amplitude at higher frequencies and the **pass-band** of the field meter is inadequate to give full value to the higher harmonics, the true r.m.s. value of the magnetic flux density may still not be greatly affected by the limited **frequency response** because of the summation given in equation (6).

Similarly, it should be recognized that uncertainties during the measurement of 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

très élevées (par exemple supérieures à 100 %) au fur et à mesure que le niveau du champ par rapport à la source se rapproche de la valeur du champ magnétique parasite. Dans ce cas, il convient d'inclure dans l'incertitude un terme supplémentaire, «pourcentage parasite», noté «% parasite», où «% parasite» est égal à $(\text{champ parasite}/\text{champ mesuré}) \times 100 \%$.

Il convient d'évaluer les incertitudes, en procédant conformément à l'ISO TAG 4, WG3 qui exige que l'écart-type associé à chaque grandeur influençant la mesure, soit déterminé sur la base de mesures précédemment effectuées ou sur l'expérience. L'écart-type combiné doit être obtenu comme la racine carrée de la somme des variances (c'est-à-dire la racine carrée de la somme des carrés des écarts-types). L'incertitude étendue (totale) doit être égale à k fois l'écart-type combiné, où k est le **facteur de couverture**. Le **facteur de couverture** doit être égal à 2, ce qui correspondra, pour des distributions gaussiennes, à un intervalle de confiance d'environ 95 %.

5.4 Enregistrement et consignation des résultats de mesure

Les renseignements nécessaires lors de l'enregistrement et de la consignation des résultats de mesure peuvent varier selon les objectifs des mesures. Il convient d'indiquer clairement les objectifs des mesures au début du document. Dans tous les cas, il convient de fournir les informations suivantes concernant les instruments et les mesures:

- identification du fabricant;
- identification du modèle;
- date des mesures;
- durée des mesures;
- **incertitude de mesure** totale;
- une indication claire concernant le champ mesuré, par exemple **champ magnétique maximal**, **champ magnétique résultant**, la composante verticale du champ, la moyenne pondérée dans le temps (TWA: Time-weighted average), la valeur efficace, etc. (Il convient d'utiliser les unités du système international; les unités usuelles peuvent être exprimées entre parenthèses);
- géométrie et dimensions de la sonde;
- date du dernier étalonnage/essai de vérification.

Les informations qu'il convient de fournir, selon le cas, sont les suivantes:

- **bande passante** de l'instrument;
- fréquence d'échantillonnage;
- descriptions de l'activité humaine lorsque des données relatives à l'exposition humaine aux champs sont présentées;
- dessins décrivant la zone et les endroits où les mesures sont effectuées;
- données statistiques, par exemple la plus grande valeur et la plus petite valeur du champ, la valeur intermédiaire, la moyenne géométrique, etc;
- résolution spectrale pour des champs contenant plusieurs fréquences;
- endroits où sont effectuées les mesures; identification des sources, conditions atmosphériques;
- identification des personnes qui effectuent les mesures;
- conditions de la source, par exemple courant de charge.

the value of the background magnetic field. For this case, the uncertainty should include an additional term, "percentage of background," abbreviated as "%background", where "%background" is equal to $(\text{background field}/\text{measured field}) \times 100 \%$.

Evaluation of uncertainties should be made in accordance with ISO TAG 4, WG 3 which requires that the standard deviation associated with each quantity influencing the measurement shall be determined on the basis of measurements performed or on the basis of experience. The combined standard deviation 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). The expanded (total) uncertainty shall be k times the combined standard deviation, where k is the **coverage factor**. The **coverage factor** shall be taken as 2 which, for Gaussian distributions, will correspond to a confidence interval of approximately 95 %.

5.4 Recording and reporting measurement results

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 should be provided at the outset. The following information pertaining to the instrumentation and measurements should also be provided in all cases:

- identification of manufacturer;
- identification of instrument model;
- date of measurements;
- time of measurements;
- total **measurement uncertainty**;
- a clear indication of what field quantity is being reported, e.g. the **maximum magnetic field**, the **resultant magnetic field**, the vertical field component, time-weighted average (TWA), r.m.s. value, etc. (SI units should be used; common units may be expressed in parentheses);
- probe size/geometry;
- date of last calibration/verification test.

Other information which should be provided, when appropriate, includes:

- instrument **pass-band**;
- sampling frequency;
- descriptions of human activity when human exposure data is presented;
- drawings which describe the area and locations where measurements are performed;
- statistical information, e.g. the largest and smallest field values, median, geometric mean, etc.;
- frequency resolution of spectra for fields containing multiple frequencies;
- measurement locations; source identification; weather conditions;
- identification of personnel performing the measurements;
- source conditions, i.e. current loading.

5.5 Méthode de mesure

5.5.1 Généralités

Il convient de mesurer les inductions magnétiques à l'aide d'instruments tri-axiaux et il est souhaitable que la mesure porte sur le **champ magnétique résultant**, sauf lorsqu'il existe une raison particulière pour utiliser des instruments mono-axiaux. Parmi les raisons pour lesquelles on peut être amené à utiliser des instruments mono-axiaux, on peut citer les cas où l'on souhaite connaître la direction du champ, le **champ magnétique maximal**, l'orientation et la forme de l'ellipse du champ magnétique et lorsque la direction d'un champ polarisé linéairement est déjà connue.

NOTE – Certains instruments tri-axiaux peuvent également déterminer ces paramètres de champ (voir article D.1).

Il est également possible d'utiliser des instruments mono-axiaux pour déterminer le **champ magnétique résultant** à l'aide des équations (3) ou (4) lorsque le niveau du champ reste stable. Dans ce cas, l'utilisation d'un support, réalisé à partir de matériaux non conducteurs, pour orienter la sonde dans des directions orthogonales, facilitera le processus de mesure.

La taille de la sonde ou parties sensibles doit tenir compte de la variation spatiale du champ mesuré. Il est souhaitable que la surface des parties sensibles soit égale ou inférieure à 0,01 m² (voir 5.1.7 et article B.1.1).

La **bande passante** de l'instrument doit être adaptée au contenu fréquentiel du champ mesuré. Lorsque le champ est tel que la **bande passante** de l'instrument pourrait influencer de façon significative le résultat de lecture (c'est-à-dire, lorsqu'il y a plusieurs fréquences dans le champ), il convient d'enregistrer et de consigner la **bande passante** en même temps que les résultats.

Lorsque le champ magnétique est produit par un système de puissance, les fréquences présentes sont normalement la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz) plus les quelques premières harmoniques. Il est souhaitable que la **bande passante** minimale utilisée pour mesurer de tels champs s'étende de la fréquence fondamentale jusqu'à 500 Hz. Une **bande passante** plus étroite ne peut être utilisée que s'il est possible de démontrer que le taux d'harmoniques est suffisamment faible pour ne faire varier que de façon négligeable le résultat de mesure, par exemple à proximité de lignes de puissance, ou s'il y a une raison particulière pour mesurer une bande de fréquences plus étroite.

NOTE – Lors de l'évaluation de la conformité aux exigences du projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5], il est nécessaire de mesurer le champ sur des **bandes passantes** étroites contenues dans la **bande passante** globale.

Il convient d'arrêter ou de ne pas utiliser des équipements portatifs qui émettent des champs électromagnétiques (par exemple des téléphones portatifs) lorsqu'on effectue des mesures de champs magnétiques.

Si les mesures portent sur les champs produits par des sources autres que le système de puissance, il est nécessaire de choisir une **bande passante** spécifique. Des champs produits par certains systèmes de traction ont une fréquence fondamentale plus faible, alors que les postes de chauffage par induction, les écrans de visualisation, les avions commerciaux, les navires et les harmoniques produites par des moteurs à vitesse réglable peuvent produire des champs avec des fréquences plus élevées. Lors de l'extension de la **bande passante** à des fréquences plus faibles, il est nécessaire de faire très attention pour éviter des erreurs provoquées par le déplacement des **sondes à bobine** dans des champs statiques. En général, de telles erreurs peuvent être évitées en immobilisant la bobine (voir note de B.1.5).

5.5 Measurement procedure

5.5.1 General

Magnetic flux density measurements should be made with three-axis instruments and should be of the **resultant magnetic field**, except where there is a particular reason for using single-axis instruments. Reasons for using single-axis instruments include the desirability to know the direction of the field and the **maximum magnetic field**, the wish to investigate the orientation and shape of the magnetic field ellipse, and cases when the direction of a linearly polarized field is already known.

NOTE – Some three-axis instrumentation can also determine these field parameters (see clause D.1).

Single-axis instruments may also be used to determine the **resultant magnetic field** using equations (3) or (4) when the field level remains stable. For this case, use of a fixture made from non-conducting materials for orienting the probe in orthogonal directions will expedite the measurement process.

The size of the probe or sensing elements shall be appropriate to the spatial variation of the field that is measured. It is recommended that the sensing elements should be of area 0,01 m² or smaller (see 5.1.7 and clause B.1.1).

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** should be recorded and reported with the results.

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 should extend from the fundamental frequency to 500 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.

NOTE – When assessing compliance with CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5], it is necessary to measure the field over particular narrow frequency **pass-bands** within the overall **pass-band**.

Portable equipment that radiates electromagnetic fields (e.g. mobile telephones) should be turned off or not be used when performing magnetic field measurements.

When measuring the fields produced by sources other than the power system, the **pass-band** will need to be chosen appropriately. Fields produced by some traction 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 (see note on B.1.5).

5.5.2 Mesure de l'exposition des êtres humains

Il convient de reconnaître que des mesures effectuées dans un champ magnétique à peu près uniforme correspondent à l'exposition globale des êtres humains, si des êtres humains sont présents sur les lieux au moment où sont effectuées les mesures. Les mesures de champs magnétiques dans des champs non uniformes ont une interprétation plus restrictive lors de la détermination de l'exposition des êtres humains, c'est-à-dire que les mesures de champs ne représentent l'exposition des êtres humains que pour la partie de l'anatomie qui coïnciderait avec l'emplacement où sont effectuées les mesures. Le choix de l'emplacement ou des endroits où sont effectuées les mesures peut varier en fonction de la source de champ et de la position relative du sujet humain, par exemple tenir compte des différences entre des rasoirs électriques, des sèche-cheveux, des machines à coudre et des postes de soudage.

Dans le cadre du processus d'élaboration d'un protocole de mesure visant à déterminer l'exposition des champs magnétiques sur les êtres humains, il convient d'indiquer clairement les objectifs et les méthodes de mesure. Une définition claire des objectifs est nécessaire pour déterminer les prescriptions applicables aux instruments et à l'étalonnage, par exemple la **bande passante** des instruments, la plage d'amplitudes, et les points d'étalonnage des fréquences. Il est souhaitable que le protocole de mesure indique le ou les paramètres du champ à mesurer, les endroits où les mesures doivent être effectuées, et la manière dont les mesures doivent être effectuées. Il convient d'insister sur le fait que, de façon générale, un seul protocole de mesure ne conviendra pas pour toutes les situations dans lesquelles les mesures sont effectuées. L'article D.3 donne des indications supplémentaires sur les objectifs et les méthodes permettant de caractériser des champs magnétiques. L'article D.4 fournit un exemple de protocole de mesure de champs magnétiques qui permet de vérifier si l'exposition des inductions magnétiques sur les êtres humains dans des postes sont conformes aux prescriptions du projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5].

6 Mesure des champs électriques alternatifs

6.1 Spécifications relatives aux instruments

Les divers types d'instruments disponibles pour caractériser des champs électriques quasi statiques sont décrits à l'article E.1. Les instruments doivent être accompagnés de tous les renseignements nécessaires, y compris les spécifications relatives aux instruments et une notice d'instructions clairement rédigée pour permettre aux utilisateurs de déterminer la conformité aux prescriptions de la présente norme, pour les aider à faire fonctionner correctement le capteur de champ, et pour évaluer l'utilité du dispositif pour leur application. Il convient d'éviter les procédures d'utilisation complexes. Les spécifications relatives aux instruments, qui doivent être fournies et/ou satisfaites, sont indiquées ci-après.

NOTE – Il est possible d'utiliser des instruments non conformes aux spécifications ci-après, si l'on est en mesure de démontrer que, dans les conditions où l'instrument est utilisé, il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus à l'aide de cet instrument et ceux obtenus à l'aide d'un capteur conforme à cette norme. Par exemple, il n'est possible d'utiliser un capteur muni d'un **détecteur de valeur redressée** avec ou sans étage d'intégration que si l'on est en mesure de démontrer que les harmoniques dans le champ sont négligeables, et uniquement si l'instrument a été étalonné pour la fréquence fondamentale dans le champ.

6.1.1 Incertitude des instruments

Il est souhaitable que le système de mesure des champs électriques alternatifs indique la valeur efficace des champs électriques uniformes avec une incertitude inférieure à $\pm(10\%$ de la lecture + 2 V/m) après avoir appliqué, si nécessaire, des **facteurs de correction**.

NOTE 1 – L'incertitude de l'instrument est déterminée à partir de plusieurs composantes, telles que l'incertitude de l'étalonnage, la dérive de température des composants électroniques, la stabilité et les sources de bruit externes. L'**incertitude de mesure** ci-dessus est associée à la conception et au fonctionnement du capteur de champ électrique dans un champ presque uniforme. L'élément de 10 % se rapporte à l'incertitude pendant l'étalonnage (voir 6.2) sur toute la plage de fréquences (**bande passante**) spécifiée pour l'instrument et comprend les incertitudes dans la valeur du champ électrique ainsi que des incertitudes supplémentaires pendant le processus

5.5.2 Measuring human exposure

It should be recognized that 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. Magnetic 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. The choice of measurement location(s) can vary depending in part on the field source and the relative position of the human subject, e.g. consider the differences between electric shavers, hair dryers, sewing machines and welders.

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 should 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) should be measured, where the measurements should be performed, and how the measurements should be performed. It is noted with emphasis that, in general, a single measurement protocol will not be suitable for all measurement situations. Additional discussions of goals and methods intended for characterizing magnetic fields are provided in D.3. An example of a magnetic field measurement protocol, which considers whether human magnetic flux density exposures in substations are in compliance with CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5], is given in D.4.

6 Measurement of alternating electric fields

6.1 Instrumentation specifications

The various types of instrumentation available for characterizing quasi-static electric fields are described in clause E.1. Sufficient information shall be provided with the instrumentation, including instrument specifications and a clearly written instruction manual to enable the user to determine compliance with this standard, to aid them in the proper operation of the field meter, and to assess the usefulness of the device for the user's application. Complicated operating procedures should be avoided. The instrument specifications that should be provided and/or satisfied are given below.

NOTE – Instruments not complying with the specifications below may be used if it can be demonstrated that, under the conditions in which the instrument is used, the results obtained will not differ significantly from those obtained with a meter in compliance with this standard. For example, a meter with a **rectified average detector**, with or without an integrating stage, may be used if it can be shown that the harmonics in the field are negligible, and if the instrument has been calibrated for the fundamental frequency in the field.

6.1.1 Instrumental uncertainty

The measuring system for alternating electric fields should indicate the r.m.s. value of uniform electric fields with an uncertainty of less than $\pm(10\% \text{ of reading} + 2 \text{ V/m})$ after **correction factors** have been applied, if appropriate.

NOTE 1 – The uncertainty of the instrument is determined from several components such as the calibration uncertainty, temperature drift of the electronics, stability and external noise sources. The above uncertainty is associated with the design and functioning of the electric field meter in a nearly uniform field. The 10 % element refers to the uncertainty during calibration (see 6.2) over the frequency range (**pass-band**) specified for the instrument, and includes uncertainties in the value of the electric field strength and additional uncertainties during

d'étalonnage (voir 6.2). Le **facteur de couverture** est 2. L'inclusion de 2 V/m tient compte d'incertitudes apparaissant pendant l'étalonnage d'instruments ayant les échelles les plus sensibles, ainsi que de mesures de champs de l'ordre de 10 V/m.

NOTE 2 – Pour les champs électriques compris entre 1 V/m et 5 V/m, il convient que l'incertitude soit inférieure à 40 % (**facteur de couverture** de 2) après application des **facteurs de correction**, si nécessaire.

NOTE 3 – D'autres sources d'**incertitude de mesure** et des recommandations sur la manière de traiter ces incertitudes sont respectivement données à l'article B.2 et en 6.3.

6.1.2 Plage d'amplitudes

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

6.1.3 Bande passante

L'instrument doit être accompagné de renseignements ou de spécifications d'étalonnage permettant à l'utilisateur d'évaluer l'incertitude maximale lors de la détermination de niveaux des champs lorsque l'instrument est utilisé dans des champs contenant différentes fréquences. Il est souhaitable que ces informations comprennent également la sensibilité de l'instrument à des fréquences au-delà de la plage utile prévue. La **réponse en fréquence** de l'instrument doit être telle que l'exigence applicable à l'incertitude de l'instrument (voir 6.1.1) est remplie dans toute la plage de fréquences pour laquelle il est prévu.

6.1.4 Plages de température de fonctionnement et d'humidité

Il est souhaitable que les plages de température et d'humidité relative, pour lesquelles l'instrument fonctionne dans les limites de l'incertitude spécifiée, ne soient pas inférieures aux plages comprises entre 0 °C et 45 °C et entre 5 % et 95 %, respectivement. Il est recommandé d'éviter des variations brutales de température susceptibles de produire de la condensation dans l'instrument et sur la poignée isolante (voir article B.2).

6.1.5 Alimentations en énergie

Si des piles (batteries) sont utilisées, il convient de prévoir un moyen pour indiquer si l'état de la pile permet un fonctionnement correct du capteur de champ. Il est souhaitable que les **dosimètres** puissent fonctionner pendant au moins 8 h dans les limites de l'incertitude assignée avant qu'il ne soit nécessaire de remplacer ou de recharger les piles. Si les piles utilisées sont rechargeables (**capteurs électro-optiques**, **capteurs d'espace libre** couplés optiquement avec le détecteur, et **capteurs de parois**) il est recommandé de ne pas faire fonctionner les instruments alors qu'ils sont branchés sur le réseau d'alimentation. Lorsque de tels raccordements sont nécessaires, il convient de démontrer que des perturbations conduites provenant de la tension du réseau, et les couplages électromagnétiques établis par l'intermédiaire des conducteurs de raccordement (au chargeur de pile) n'affectent pas la mesure (voir 5.1.8). Il convient de n'avoir aucune liaison filaire avec des **capteurs d'espace libre**.

6.1.6 Lisibilité des échelles de graduation

Il est souhaitable que les dimensions des cadrans ou des afficheurs numériques des capteurs de champ électrique d'espace libre soient suffisamment grandes pour permettre de lire les valeurs à une distance suffisante afin d'éviter d'introduire des perturbations importantes du champ électrique dues aux effets de proximité de l'observateur (voir article B.2). L'utilisation de **capteurs d'espace libre** munis de dispositifs d'affichage distants (voir E.2.1) permet d'éviter les problèmes liés à la lecture d'un dispositif d'affichage placé à une certaine distance. Si plusieurs plages de sensibilité sont prévues, il convient d'indiquer la valeur à pleine échelle de la plage choisie, et il est souhaitable que les unités soient facilement interprétables. Pour ce qui est des instruments à sélection automatique du calibre, la plage d'amplitudes peut être indiquée ailleurs, soit dans la notice d'utilisation. Il est souhaitable que les instruments indiquent clairement les unités affichées.

the calibration process (see 6.2). The **coverage factor** is 2. The inclusion of 2 V/m anticipates instrumental uncertainties during the calibration of the most sensitive scales and when fields in the order of 10 V/m are measured.

NOTE 2 – For electric fields between 1 V/m and 5 V/m, the uncertainty should be less than $\pm 40\%$ (**coverage factor** 2) after **correction factors** have been applied, if appropriate.

NOTE 3 – Other sources of **measurement uncertainty** and guidelines on the treatment of uncertainties are given in B.2 and 6.3, respectively.

6.1.2 Magnitude range

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

6.1.3 Pass-band

The instrument shall be provided with calibration data or specifications enabling the user to assess the maximum uncertainty in determining field levels when using the instrument in fields containing different frequencies. This information should also include the sensitivity of the instrument to frequencies beyond the intended useful range. The **frequency response** of the instrument shall be such that the requirement of the instrumental uncertainty (see 6.1.1) is fulfilled over the frequency range for which it is intended.

6.1.4 Operating temperature and humidity ranges

The temperature and relative humidity ranges for which the instrument operates within the specified uncertainty should be no less than 0 °C to 45 °C and 5 % to 95 %, respectively. Sudden temperature changes that can lead to condensation in the instrument and/or on the insulating handle should be avoided (see clause B.2).

6.1.5 Power supplies

If batteries are used, provision should be made to indicate whether the battery condition is adequate for proper operation of the field meter. Survey type instruments should be capable of at least 8 h operation within their rated uncertainty before replacement or recharging of the batteries becomes necessary. If rechargeable batteries are used (**electro-optic meters**, **free-body meters** optically coupled to the detector, and **ground reference meters**), it is recommended not to operate the instrumentation while it is connected to the mains voltage. When such connections are necessary, it should be demonstrated that conducted disturbances from the mains voltage, and electromagnetic coupling via the connecting leads (to the battery charger) not affect the measurement (see 5.1.8). There should be no wire connections to **free-body meters**.

6.1.6 Readability of scale

The meter dial markings or digital displays of free-body electric field meters should be large enough to be read at a distance sufficient to avoid significant perturbations of the electric field due to proximity effects of the observer (see clause B.2). Use of **free-body meters** with remote displays (see E.2.1) avoids the difficulties associated with reading displays from a distance. If more than one range of sensitivity is provided, the full scale value of the selected range should be indicated, and the units should be readily interpretable. For auto-ranging instrumentation, the magnitude range may be indicated elsewhere, e.g. in the user manual. The instrumentation should provide a clear indication of the units being displayed.

6.1.7 Dimensions des instruments

Il convient d'indiquer les dimensions des capteurs de champ électrique en fonction du type de capteur:

- a) **capteur d'espace libre**: dimensions de la sonde et longueur de la poignée isolante;
- b) **capteur de paroi**: dimensions de la sonde et du détecteur et longueur du câble coaxial de liaison;
- c) **capteur électro-optique**: dimensions de la sonde et du détecteur et longueur de la liaison par fibres optiques.

6.1.8 Compatibilité électromagnétique

Champ magnétique à fréquence industrielle

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

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

En ce qui concerne les autres prescriptions relatives à l'immunité et aux émissions, voir 5.1.8.

6.1.9 Robustesse

Il est souhaitable que le capteur et les autres composants du système soient suffisamment robustes pour supporter les vibrations et les chocs subis lors du transport. L'utilisation d'une mallette de transport est recommandée.

6.1.10 Poids

Il convient d'étudier le poids des instruments. Il est souhaitable que le poids des capteurs de champ électrique d'espace libre soit maintenu aussi faible que possible pour permettre de tenir facilement l'instrument par une poignée isolante d'une longueur de 2 m.

6.2 Etalonnage

6.2.1 Généralités

Les systèmes de mesure doivent être soumis à des étalonnages et à des vérifications de leur étalonnage pendant leur durée de vie. Les essais d'étalonnage mentionnés dans la présente norme sont des **essais de type** et des **essais de réception**. Les **essais de type** sont normalement effectués par le fabricant sur un ou plusieurs dispositifs. Les **essais de réception** sont normalement effectués une seule fois par le fabricant sur chaque capteur de champ. Il est nécessaire de répéter les **essais de réception** si le capteur de champ a fait l'objet de modifications ou de réparations importantes. Les essais de vérification sont effectués périodiquement pendant l'utilisation de l'instrument (voir 6.2.4). Il convient d'assurer la traçabilité de tous les étalonnages effectués à partir des étalons nationaux et internationaux via une chaîne ininterrompue d'étalonnages, tous ayant des incertitudes spécifiées.

6.2.2 Procédure d'étalonnage

Les étalonnages sont prescrits comme faisant partie des **essais de type**, des **essais de réception** (voir 6.2.1), et essais de vérification périodique (voir 6.2.4). Il convient de suivre,

6.1.7 Instrument dimensions

The dimensions for electric field meters should be given according to meter type:

- a) **free-body meter**: probe dimensions and length of insulating handle;
- b) **ground reference meter**: probe and detector dimensions and length of connecting coaxial cable;
- c) **electro-optic meter**: probe and detector dimensions and length of fibre optic connection.

6.1.8 Electromagnetic compatibility

Power frequency magnetic field

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

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

See 5.1.8 for other immunity and emission requirements.

6.1.9 Durability

The indicating meter and other system components should be rugged enough to withstand vibration and shock resulting from transport. A carrying case is desirable.

6.1.10 Weight

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

6.2 Calibration

6.2.1 General

Measurement systems shall undergo calibration and verification of their calibration throughout their service life. Calibration tests referred to in this standard are **type tests** and **acceptance tests**. **Type tests** are normally performed by the manufacturer on one or more devices. **Acceptance tests** are normally performed only once by the manufacturer on each field meter. **Acceptance tests** need to be repeated if major changes or repairs to the instrument have been made. Verification tests are performed at time intervals during use of the instrument (see 6.2.4). All calibrations should be traceable to national and international standards through an unbroken chain of calibrations, all having stated uncertainties.

6.2.2 Calibration procedure

Calibrations are required as part of **type tests**, **acceptance tests** (see 6.2.1), and periodic verification tests (see 6.2.4). The procedures described in this subclause should be followed as

pour chaque cas, les procédures appropriées décrites dans la présente section. Au cours de la procédure d'étalonnage, il convient de placer la sonde du capteur de champ dans un champ presque uniforme produit par des plaques parallèles en fonction du type de capteur, comme décrit à l'article A.2. Il est souhaitable que l'écart du champ au centre des plaques parallèles par rapport à la valeur du champ uniforme, c'est-à-dire le champ produit par des plaques parallèles à l'infini, soit inférieur à 1 % (voir article A.2). Il est souhaitable que la distance séparant les plaques parallèles soit suffisante pour éviter les effets de proximité lorsque la sonde du capteur de champ est introduite entre les plaques (voir article A.2). Par exemple, des **capteurs d'espace libre**, de dimensions diagonale inférieures à 0,23 m, peuvent être étalonnés au centre de l'espace de 1,5 m × 1,5 m × 0,75 m, séparant les plaques parallèles. Il convient d'utiliser la poignée isolante normalement employée pendant les mesures de champs, pour maintenir le capteur de champ en place entre les plaques. Les dimensions des plaques parallèles peuvent être augmentées ou réduites, selon qu'il s'agit respectivement de **capteurs d'espace libre** de plus grandes ou de plus petites dimensions.

NOTE – D'autres méthodes permettant de produire des champs électriques sont acceptées, à condition qu'elles génèrent un champ uniforme égal dans un volume égal.

Il convient de procéder à l'étalonnage des capteurs mono-axiaux et de chacun des trois axes des capteurs de champ tri-axiaux en utilisant des champs électriques sinusoïdaux aux niveaux et aux fréquences indiqués par les spécifications des instruments.

Il est souhaitable que le champ électrique dans le système de plaques parallèles soit connu avec une incertitude inférieure à $\pm 3\%$ (**facteur de couverture 1**). L'amplitude peut être déterminée par un calcul effectué à partir des mesures de l'espace séparant les plaques parallèles et de tension (voir article A.2), ou par une mesure directe en utilisant un capteur de champ électrique de référence étalonné avec une **incertitude de mesure** suffisamment faible.

L'incertitude de l'étalonnage est déterminée par des facteurs tels que l'incertitude dans la valeur du champ électrique dans le système d'étalonnage ($\pm 3\%$), la résolution dans la lecture de l'instrument soumis à l'essai, et la variation de la lecture si l'instrument soumis à l'essai est placé à plusieurs reprises dans le système d'étalonnage. Il est souhaitable que l'**incertitude de mesure** totale du procédé d'étalonnage (**facteur de couverture 1**) ne soit pas supérieure à $\pm(5\% + 1 \text{ V/m})$. Il convient d'utiliser un **facteur de couverture** de 2 lors de la spécification de l'incertitude des instruments, c'est-à-dire que, dans le cas présent, l'incertitude des instruments devrait être $\leq \pm(10\% + 2 \text{ V/m})$. Il convient d'assurer la traçabilité de l'étalonnage par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux. Des recommandations sur la manière de traiter toutes les incertitudes et une liste de sources d'incertitude sont respectivement données en 6.3 et B.2.

En ce qui concerne les instruments munis d'un dispositif d'affichage analogique, il convient d'enregistrer au moins trois niveaux de champ électrique pour chaque plage de mesure du capteur de champ, lesquels doivent normalement suffire à couvrir 30 % à 90 % de la pleine échelle. Pour des capteurs de champ à dispositif d'affichage numérique, il convient d'obtenir au moins quatre niveaux de champ électrique, suffisants pour couvrir 10 % à 90 % de la pleine échelle. Il convient d'étalonner les capteurs de champ à sélection automatique du calibre sur chaque plage en au moins trois points représentatifs qui couvrent la majeure partie de la plage. Sur la plage la plus sensible, il est souhaitable que l'un des points d'étalonnage se situe à environ 10 % de la valeur maximale *pour cette plage*. Sur la plage la moins sensible, il est souhaitable que l'un des points d'étalonnage se situe à 90 % de la valeur maximale *pour cette plage*. Il convient d'obtenir le champ mesuré maximal (capteurs de type **capteur d'espace libre** et **capteur électro-optique**) lorsque l'on fait tourner l'axe de la sonde de $\pm 10^\circ$ par rapport à la direction verticale (voir figure A.7). Tout capteur de champ qui s'avère incapable de répondre aux critères ci-dessus doit être considéré comme imprécis. Pour au moins un niveau de champ électrique, il convient d'effectuer les étalonnages à trois fréquences qui couvrent la **bande passante**, c'est-à-dire à la fréquence la plus élevée, à la fréquence la plus faible, et à une fréquence intermédiaire.

appropriate for each case. During calibration, the field meter probe should be placed in a nearly uniform field produced with parallel plates according to meter type, as described in clause A.2. The departure of the field at the centre of the parallel plates from the uniform field value, i.e. the field produced by infinite parallel plates, should be less than 1 % (see clause A.2). The parallel plate spacing should be sufficient to avoid proximity effects when the field meter probe is introduced between the plates (see clause A.2). For example, **free-body meters** with no diagonal dimension greater than 0,23 m may be calibrated at the centre of parallel plates 1,5 m × 1,5 m × 0,75 m spacing. The insulating handle normally employed during field measurements should be used to support the field meter between the plates. The parallel plate dimensions may be scaled upward or downward for larger or smaller **free-body meters**.

NOTE – Other methods for producing electric fields are acceptable provided that they produce an equally uniform field over an equal volume.

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

The electric field strength in the parallel plates system should be known with an uncertainty of less than ± 3 % (**coverage factor 1**). The magnitude may be determined by calculation based on measurements of the parallel plate spacing and voltage (see clause A.2), or by direct measurement with a calibrated reference electric field strength meter with a sufficiently low **measurement uncertainty**.

The uncertainty of the calibration will be determined by such factors as the uncertainty in the value of the electric field strength in the calibration system (± 3 %), the resolution in the reading of the instrument under test, and the variation of the reading if the instrument under test is repeatedly placed into the calibration system. The overall uncertainty of the calibration process (**coverage factor 1**) should be no greater than $\pm(5$ % + 1 V/m). A **coverage factor** of 2 should be used when specifying instrumental uncertainty, i.e. the instrumental uncertainty would be in the present case $\leq \pm(10$ % + 2 V/m). The calibration should be traceable to national and/or international standards. Guidelines on the treatment of all uncertainties and a listing of the sources of uncertainty are given in 6.3 and clause B.2, respectively.

At least three electric field levels for each range of the field meter, sufficient to span 30 % to 90 % of the full scale, should be recorded for meters with analogue displays. At least four electric field levels, sufficient to span 10 % to 90 % of full scale, should be recorded for meters with digital displays. Field meters with auto-ranging capabilities should be calibrated on each range at no less than three representative points which span most of the range. On the most sensitive range, one of the calibration points should be near 10 % of the maximum value *for that range*. On the least sensitive range, one of the calibration points should be 90 % of the maximum value *for that range*. The maximum measured field (**free-body** and **electro-optic type meters**) should occur when the probe axis is rotated to within $\pm 10^\circ$ of the vertical direction (see figure A.7). Field meters with readings that fail to satisfy the above criteria should be considered inaccurate. For at least one electric field level, calibrations should be performed at three of the frequencies which span the **pass-band**, i.e. at the highest and lowest frequencies, and one intermediate frequency.

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

6.2.3 Documentation relative aux essais

Il est souhaitable que les fabricants de capteurs de champ fournissent des documents contenant les résultats d'essai et qu'ils fournissent, en plus des données relatives aux spécifications des instruments (voir 6.1.1 à 6.1.10), les renseignements suivants:

- identification de l'appareillage d'essai;
- identification du client;
- identification du modèle d'instrument et de son numéro de série;
- un numéro unique de rapport d'essai;
- la ou les date(s) de l'essai ou des essais;
- identification de la ou des personnes acceptant la responsabilité technique concernant le rapport d'essai.

Il est également souhaitable que les fabricants fournissent des documents décrivant leurs procédures d'étalonnage et indiquant au moins les renseignements suivants, selon le cas applicable:

- les dimensions des plaques parallèles;
- les instruments de mesure de la tension délivrée au système de plaques parallèles; l'incertitude des instruments; la date de la dernière vérification de l'étalonnage;
- l'incertitude du système de mesure de référence; les dimensions des sondes; la **bande passante**; la date de la dernière vérification de l'étalonnage.

Il convient de tenir ces renseignements à la disposition des clients sur simple demande de leur part. En ce qui concerne les instruments destinés à être utilisés dans des situations potentiellement litigieuses, il est recommandé de vérifier l'étalonnage des instruments pour la plage d'amplitudes et pour la plage de fréquences concernées, en utilisant un autre dispositif d'étalonnage.

Il est souhaitable que les laboratoires d'essai soient également conformes aux prescriptions ci-dessus, selon le cas applicable. Les opérateurs manipulant les appareils d'étalonnage sont invités à utiliser un système qualité conforme au Guide 25 de l'ISO [31].

6.2.4 Essais de vérification

Dans la mesure du possible, il est souhaitable que les utilisateurs des instruments vérifient les performances du capteur de champ en utilisant la technique d'injection de tension (voir article A.2) ou de courant, au moment où le capteur est étalonné dans un champ connu ou peu de temps après. Cette pratique devrait permettre d'utiliser la technique d'injection de tension ou de courant comme un moyen de vérification périodique d'étalonnage lorsque l'on ne dispose pas de systèmes de plaques parallèles.

Il n'est pas nécessaire que les vérifications de l'étalonnage par l'utilisateur des instruments soient aussi exhaustives que les **essais de réception**. Par exemple, à des fréquences qui conviennent pour l'application, il suffit d'effectuer des vérifications en un ou deux points pour chaque plage du capteur de champ qui est utilisé pour les mesures, afin de vérifier le **facteur d'échelle**.

NOTE – Il est souhaitable que l'un des points d'essai se situe dans la moitié supérieure d'une plage donnée.

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

6.2.3 Test documentation

Manufacturers of field meters should document the results of tests and provide, in addition to data for the instrument specifications (see 6.1.1 to 6.1.10), the following information:

- identification of the test facility;
- identification of the client;
- identification of the instrument model and serial number;
- a unique test report number;
- the date(s) of the test(s);
- identification of person(s) accepting technical responsibility for test reports.

Instrument manufacturers should also document their calibration procedures indicating at least the following information, as applicable:

- parallel plate dimensions;
- instrumentation for the measurement of voltage to parallel plates; instrumental uncertainty; date of last calibration verification;
- uncertainty of reference measurement system; probe dimensions; **pass-band**; date of last calibration verification.

This information should be made available to clients upon request. As regards instrumentation intended for use in situations where litigation is anticipated, it is recommended that the instrument calibration be verified for the relevant magnitude range and frequency range by a second independent facility.

Testing laboratories should also comply with the above requirements as applicable. Operators of calibration facilities are encouraged to use a quality system that conforms to ISO Guide 25 [31].

6.2.4 Verification tests

When possible, it is desirable for the instrument user to verify the performance of the field meter using the current or voltage injection technique (see clause A.2) at the time when the field meter is calibrated in a known field or shortly thereafter. This practice would allow the current or voltage injection technique to be used for periodic verifications of the calibration when a parallel plates system is not available.

Verification of the calibration by the instrument user need not be as exhaustive as **acceptance tests**. For example, at frequencies relevant to the measurement application, checks of one or two points for each magnitude range of the field meter would be adequate for verification of the **scale factor**.

NOTE – It is recommended that one test point be in the upper half of a given range.

Il convient de documenter les résultats des essais de vérification et de les tenir à disposition. Il est souhaitable que les documents indiquent la date des essais et le nom de la personne ou des personnes qui ont effectué les essais.

Il convient de procéder, à intervalles réguliers, à la vérification de l'étalonnage sur les plages d'amplitudes que l'on compte utiliser. Un intervalle initial de douze mois est suggéré. Cet intervalle peut être modifié en fonction de la dérive de la réponse du capteur de champ entre deux vérifications. Il convient également d'envisager des vérifications avant et après de longues périodes d'utilisation du capteur de champ, par exemple si des mesures sont effectuées sur une période de quelques jours à une semaine. Cette pratique revêt une importance particulière lorsqu'il est difficile d'un point de vue logistique de se rendre ultérieurement aux endroits où les mesures ont été effectuées.

6.3 Incertitude de mesure

Afin de déterminer l'incertitude totale associée aux valeurs efficaces mesurées du champ électrique dans différents environnements de mesure, il convient de tenir raisonnablement compte des diverses sources d'incertitude. Des sources potentielles d'incertitude sont identifiées en 6.2 et à l'article B.2. De nombreuses sources d'incertitude peuvent être rendues négligeables ou, selon le type de capteur de champ, ne peuvent être appliquées dans une situation donnée. Les discussions de 5.3, à propos de la **bande passante**, des mesures de champs contenant des harmoniques et des mesures effectuées à proximité de certains niveaux de champs parasites, s'appliquent également dans ce cas.

Il convient d'appliquer des **facteurs de correction** connus (voir article A.2) aux lectures obtenues avec des capteurs de champ électrique. Si l'application de **facteurs de correction** n'est pas possible, il convient de traiter l'influence des **facteurs de correction** comme une **incertitude de mesure** ajoutée.

Il convient d'évaluer les incertitudes en procédant conformément à ISBN 92-67-01075-1 qui exige que l'écart-type associé à chaque grandeur influençant la mesure soit déterminé sur la base de mesures précédemment effectuées ou sur la base de l'expérience. L'écart-type combiné doit être obtenu comme la racine carrée de la somme des variances (c'est-à-dire la racine carrée de la somme des carrés des écarts-types). L'incertitude étendue (totale) doit être égale à k fois l'écart-type combiné, où k est le **facteur de couverture**. Le **facteur de couverture** doit être égal à 2, ce qui correspond, pour des distributions gaussiennes, à un intervalle de confiance d'environ 95 %.

6.4 Enregistrement et consignation des résultats de mesure

Les renseignements nécessaires lors de l'enregistrement et de la consignation des résultats de mesure peuvent varier selon les objectifs des mesures. Il convient d'indiquer clairement les objectifs des mesures au début du document. Dans tous les cas, il convient de fournir les informations suivantes concernant les instruments et les mesures:

- identification du fabricant;
- identification du modèle;
- date des mesures;
- durée des mesures;
- **incertitude de mesure** totale;
- une indication claire concernant l'amplitude de champ mesuré, par exemple le **champ électrique maximal**, le **champ électrique résultant**, la composante verticale du champ, la moyenne pondérée dans le temps (TWA), la valeur efficace, etc. (Il convient d'utiliser les unités du système international);
- géométrie et dimensions de la sonde;
- date du dernier étalonnage/essai de vérification.

The results of verification tests should be documented and readily accessible. The documentation should include the date of the tests and the identification of the person(s) performing the tests.

Verification of the calibration on the magnitude ranges intended for use should be performed at regular intervals. An initial interval of twelve months is suggested. This interval may be altered depending on the drift of the field meter response between verifications. Verifications also should be considered prior to and after extended periods of field meter use, e.g. if measurements are performed over a period of several days to a week. This practice is particularly important when there are logistical difficulties in returning to the measurement location at a later time.

6.3 Measurement uncertainty

In order to determine the total uncertainty associated with r.m.s. measurements of the electric field strength in different measurement environments, there should be an appropriate accounting of the various sources of uncertainty. Possible sources of uncertainty are identified in 6.2 and clause B.2. Many sources of uncertainty can be made negligible or, depending on the type of field meter, may not apply in a given measurement situation. The discussions in 5.3 regarding **pass-band** and measurements of fields with harmonics, and measurements near background field levels, are applicable in the present case.

Known **correction factors** (see clause A.2) should be applied to readings obtained with electric field strength meters. If it is impractical to apply **correction factors**, the influence of the **correction factors** should be treated as an added **measurement uncertainty**.

Evaluation of uncertainties should be made in accordance with ISBN 92-67-01075-1, which requires that the standard deviation associated with each quantity influencing the measurement be determined on the basis of the measurements previously performed or on the basis of experience. The combined standard deviation 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). The expanded (total) uncertainty shall be k times the combined standard deviation, where k is the **coverage factor**. The **coverage factor** shall be taken as 2 which, for Gaussian distributions, will correspond to a confidence interval of approximately 95 %.

6.4 Recording and reporting measurement results

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 should be indicated at the outset. The following information pertaining to the instrumentation and measurements should also be provided in all cases:

- identification of the manufacturer;
- identification of instrument model;
- date of measurements;
- time of measurements;
- total **measurement uncertainty**;
- a clear indication of what field quantity is being reported, e.g. the **maximum electric field**, the **resultant electric field**, the vertical field component, time-weighted average (TWA), r.m.s. value, etc. SI units should be used;
- probe size/geometry;
- date of last calibration/verification test.

Les informations suivantes figurent parmi les informations qu'il convient de fournir, selon le cas:

- descriptions de l'activité humaine lorsque des données relatives à l'exposition humaine sont présentées;
- **bande passante** de l'instrument;
- dessins décrivant la zone et les endroits où les mesures sont effectuées;
- données statistiques, par exemple la plus grande valeur et la plus petite valeur du champ, la valeur intermédiaire, la moyenne géométrique, etc;
- résolution spectrale pour des champs contenant plusieurs fréquences;
- endroits où sont effectuées les mesures; identification des sources, conditions atmosphériques;
- identification des personnes qui effectuent les mesures.

6.5 Méthode de mesure

6.5.1 Généralités

Les mesures de **champs non perturbés** doivent être effectuées à l'aide d'instruments qui indiquent l'amplitude et la direction du champ électrique, par exemple des **capteurs d'espace libre** mono-axiaux, des **capteurs d'espace libre** tri-axiaux qui indiquent l'orientation du champ, des **capteurs électro-optiques**, et des **capteurs de paroi** (voir article E.1). La taille de la sonde ou parties sensibles doit être adaptée à la variation spatiale du champ et à la proximité de plans conducteurs voisins (voir B.2.8 et B.2.3).

La **bande passante** de l'instrument doit être adaptée au contenu fréquentiel du champ mesuré. Lorsque le champ est tel que la **bande passante** de l'instrument pourrait influencer de façon significative le résultat de lecture (c'est-à-dire, lorsqu'il y a plusieurs fréquences dans le champ), il convient d'enregistrer et de consigner la **bande passante** en même temps que les résultats.

Lorsque des champs électriques sont générés par des systèmes d'alimentation en énergie électrique, c'est-à-dire par des lignes de puissance ou des transformateurs, etc., la fréquence prédominante est la fréquence industrielle de 50 Hz ou 60 Hz. Un instrument à **bande passante** étroite centrée sur la fréquence industrielle convient, dans de tels cas, pour mesurer la valeur efficace du champ électrique.

Si les mesures portent sur des champs électriques produits par d'autres sources, par exemple sur des avions commerciaux, des navires et certains trains électriques, il est possible que la fréquence fondamentale soit très différente de 50 Hz/60 Hz, auquel cas il devient nécessaire de choisir la **bande passante** qui convient.

Il convient d'arrêter ou de ne pas utiliser des équipements portatifs qui émettent des champs électromagnétiques (par exemple des téléphones portatifs) lorsqu'on effectue des mesures de champs électriques.

Pendant les mesures de champs électriques, il convient de veiller à éviter les effets de proximité de l'opérateur ainsi que d'autres personnes susceptibles de se trouver au voisinage de la sonde. Il peut se produire des perturbations importantes du champ, susceptibles d'introduire des erreurs inacceptables dans la mesure (voir article B.2).

6.5.2 Mesure de l'exposition des êtres humains

Il convient de reconnaître que des mesures effectuées dans un champ électrique presque uniforme correspondent à l'exposition globale des êtres humains, si des êtres humains sont

Other information which should be provided, when appropriate, includes:

- descriptions of human activity when human exposure data is presented;
- instrument **pass-band**;
- drawings which describe the area and locations where measurements are performed;
- statistical information, e.g. the largest and smallest field values, median, geometric mean, etc.;
- frequency resolution of spectra for fields containing multiple frequencies;
- measurement locations; source identification; weather conditions;
- identification of personnel performing measurements.

6.5 Measurement procedure

6.5.1 General

Unperturbed field measurements shall be made with instrumentation that indicates the magnitude and direction of the electric field, e.g. single-axis **free-body meters**, three-axis **free-body meters** that indicate field orientation, **electro-optic meters**, and **ground referenced meters** (see clause E.1). The size of the probe or sensing elements shall be appropriate for the spatial variation of the field and the proximity of nearby conducting planes (see B.2.8 and B.2.3).

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** should be recorded and reported with the results.

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 r.m.s. value of the electric field.

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

Portable equipment that radiates electromagnetic fields (e.g. mobile telephones) should be turned off or not be used when performing electric field measurements.

During electric field measurements, particular attention should be given to avoiding proximity effects of the observer as well as others that may be in the vicinity of the field probe. Significant perturbation of the field can occur, capable of introducing unacceptable errors in the measurement (see clause B.2).

6.5.2 Measuring human exposure

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

présents sur les lieux au moment où sont effectuées les mesures. Les mesures de champs électriques dans des champs non uniformes ont une interprétation plus restrictive lors de la détermination de l'exposition des êtres humains, c'est-à-dire que les mesures de champs ne représentent l'exposition que pour la partie de l'anatomie humaine qui coïnciderait avec l'emplacement où sont effectuées les mesures. Le choix de l'emplacement ou des endroits où sont effectuées les mesures peut varier en fonction de la source de champ et de la position relative du sujet humain, par exemple, il faut tenir compte des différences entre des lignes de puissance, des sèche-cheveux, des machines à coudre et des postes de soudage.

Contrairement au champ magnétique, les champs électriques seront perturbés par le corps humain. Du fait que les limites d'exposition sont exprimées en terme de champ électrique non perturbé, et pour d'autres raisons (voir article E.3), cette norme ne concerne que la caractérisation des champs électriques non perturbés.

Dans le cadre du processus d'élaboration d'un protocole de mesure visant à déterminer l'exposition humaine aux champs électriques, il convient d'indiquer clairement les objectifs et les méthodes de mesure. Une définition claire des objectifs est nécessaire pour déterminer les prescriptions applicables aux instruments et à l'étalonnage, soit la **bande passante** des instruments, la plage d'amplitudes, et les points d'étalonnage des fréquences. Il est souhaitable que le protocole de mesure indique le ou les paramètres du champ à mesurer, les endroits où les mesures doivent être effectuées, et la manière dont les mesures doivent être effectuées. Il convient d'insister sur le fait que, de façon générale, un seul protocole de mesure ne conviendra pas pour toutes les situations dans lesquelles les mesures sont effectuées. L'article E.3 donne des indications supplémentaires sur les objectifs et les méthodes permettant de caractériser des champs électriques. L'article E.4 fournit un exemple de protocole de mesure de champs électriques permettant de vérifier si l'exposition des êtres humains aux champs électriques dans des postes est conforme aux prescriptions du projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5].

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. The choice of measurement location(s) can vary depending in part on the field source and the relative position of the human subject, e.g. consider the differences between power lines, hair dryers, sewing machines and welders.

Unlike the magnetic field case, electric fields will be perturbed by the human body. Because exposure limits are expressed in terms of the unperturbed electric field, and for other reasons (see clause E.3), the focus of this standard is concerned with providing a characterization of the unperturbed electric field.

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 should 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) should be measured, where the measurements should be performed, and how the measurements should be performed. It is noted with emphasis that, in general, a single measurement protocol will not be suitable for all measurement situations. Additional discussions of goals and methods intended for characterizing electric fields are provided in clause E.3. An example of an electric field measurement protocol, which considers whether human electric field strength exposures in substations are in compliance with CENELEC Prestandard ENV 50166-1 [5], is given in clause E.4.

Annexe A (normative)

Méthodes d'étalonnage

A.1 Etalonnage des capteurs d'induction magnétique

L'étalonnage d'un capteur de champ magnétique est normalement effectué en introduisant la sonde dans un champ magnétique presque uniforme, d'amplitude et de direction connues. Il est possible de produire des champs magnétiques connus en utilisant des systèmes de **bobines** de formes circulaires et rectangulaires [3], [17], [35], [53], [56], [69]. Par exemple, on a souvent utilisé des **bobines** de Helmholtz pour générer de tels champs. La figure A.1 [17] fait une comparaison entre l'uniformité de champs produits par des **bobines** carrées et circulaires uniques et des **bobines** de Helmholtz carrées et circulaires. La figure A.1 indique l'écart du champ magnétique axial, en pourcentage, en fonction d'une distance normalisée par rapport à l'axe de chaque système de **bobines**, où la distance est indiquée suivant une coordonnée cartésienne (voir figure A.2 pour le cas d'une boucle carrée unique). La distance est donnée comme un pourcentage du rayon pour les **bobines** circulaires et comme un pourcentage de la moitié de la dimension du côté pour les **bobines** carrées.

Une boucle unique, composée de plusieurs tours de fil, ayant une forme rectangulaire, et utilisée pour produire le champ est décrite ci-après, parce que les équations permettant de calculer le champ en tous points de l'espace sont définies [36]; [69] et que le système de **bobines** est simple à réaliser. La simplicité de la construction entraîne une réduction de l'uniformité du champ, mais elle permet toutefois d'obtenir facilement une uniformité suffisante pour les besoins de l'étalonnage.

La composante z de l'induction magnétique produite par une boucle rectangulaire $2a \times 2b$ en un point situé dans l'espace $P(x,y,z)$ est donnée par l'expression [36], [69]

$$B_z = \frac{\mu_0 I N}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} - \frac{C_\alpha}{r_\alpha (r_\alpha + d_\alpha)} \right] \quad (7)$$

où

N est le nombre de spires;

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

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

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

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

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

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

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

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

I est la valeur efficace du courant en ampères;

μ_0 est la perméabilité de l'air;

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

Annex A (normative)

Calibration methods

A.1 Calibration of magnetic flux density meters

Calibration of a magnetic field meter is normally done by introducing the probe into a nearly uniform magnetic field of known magnitude and direction. Known magnetic fields may be produced using coil systems with circular and rectangular geometries [3], [17], [35], [53], [56], [69]. For example, Helmholtz coils have frequently been employed to generate such fields. Comparison of field uniformity for fields produced by single square and circular coils, and square and circular Helmholtz coils are shown in figure A.1 [17]. Figure A.1 shows the departure of the axial magnetic field, in percentage, as a function of normalized distance from the axis of each coil system, where the distance is along a Cartesian coordinate (see figure A.2 for the case of the single square loop). The distance is given as a percentage of the radius for the circular coils and as a percentage of half the side dimension for the square coils.

A single loop of many turns of wire with rectangular geometry used to produce the field is described below because the equations for calculating the field at all points in space are in closed form [36], [69] and the coil system is simple to construct. The simplicity of construction is at the expense of reduced field uniformity, but a sufficient uniformity for calibration purposes is readily obtained.

The z -component of the magnetic flux density, produced by a rectangular loop $2a \times 2b$ at a point in space $P(x,y,z)$, is given by the expression [36], [69]

$$B_z = \frac{\mu_0 I N}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} - \frac{C_\alpha}{r_\alpha (r_\alpha + d_\alpha)} \right] \quad (7)$$

where

N is the number of turns;

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

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

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

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

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

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

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

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

I is the r.m.s. current in amperes;

μ_0 is the permeability of the air;

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

La dérivation de l'équation (7) suppose que les conducteurs dans la boucle de courant ont des sections transversales négligeables. On l'exprime, à titre indicatif

$$B_z = \frac{\mu_0 IN\sqrt{2}}{\pi a} \quad (8)$$

au centre d'une boucle carrée ayant des côtés de dimension $2a$. L'équation (7) a servi à calculer les valeurs de champ au centre et à proximité d'une boucle carrée ayant des dimensions de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. L'écart en pourcentage par rapport à la valeur du champ magnétique central en des points localisés dans le plan de la boucle et dans des plans situés à $0,03 \text{ m}$ au-dessus et au-dessous du plan de la boucle (entre parenthèses) sont illustrés à la figure A.3. La figure A.3 illustre également le dessin à l'échelle d'une sonde de champ magnétique de $0,10 \text{ m}$ de diamètre. L'écart du champ magnétique par rapport à la valeur centrale, sur toute la section transversale de la sonde de $0,10 \text{ m}$ de diamètre, est inférieur à 1% . La figure A.4 donne une vue schématique de la sonde, de la boucle d'étalonnage carrée, et du circuit associé utilisé pour l'alimentation des **bobines**.

NOTE – L'incertitude (**facteur de couverture** 1) dans la valeur du champ étalon est déterminée par les incertitudes associées au calcul de B_z . Par exemple, dans le cas d'une boucle carrée $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (voir articles A.3 et A.4), l'incertitude est due aux incertitudes sur le courant de mesure I , la dimension des côtés de la boucle, et l'effet de la non-uniformité du champ magnétique ($<0,5 \%$ pour une sonde de $0,10 \text{ m}$ de diamètre). L'incertitude liée à la dimension du côté de la boucle carrée peut être due à la section transversale non négligeable du faisceau de conducteurs. La dimension du côté de la boucle peut être considérée comme la distance entre les centres des faisceaux de conducteurs avec une incertitude égale à \pm le «diamètre» du faisceau de conducteurs (voir figure A.4). L'incertitude résultante sur la valeur de l'induction magnétique est donnée par la racine carrée de la somme des carrés. Si, par exemple, des incertitudes dans la détermination de I et de la dimension du côté sont respectivement $\pm 0,2 \%$ et $\pm 1,0 \%$, l'incertitude résultante dans la valeur du champ étalon pour la sonde de $0,10 \text{ m}$ de diamètre est $\pm[(0,2)^2 + (1,0)^2 + (0,5)^2]^{1/2}$ ou $\pm 1,1 \%$ (**facteur de couverture** 1).

Il est évident qu'un capteur de champ muni d'une **sonde à bobine** indique la valeur du champ magnétique, qui est une valeur moyenne sur toute la section transversale de la sonde. La différence entre cette valeur moyenne et la valeur centrale (voir équation (8)) sera inférieure à l'écart maximal en pourcentage par rapport à la valeur centrale. Par exemple, lorsque le plus grand écart du champ magnétique par rapport à la valeur centrale est de $0,63 \%$ pour la sonde de $0,10 \text{ m}$ (dans le plan de la boucle), le champ moyen est supérieur de seulement $0,31 \%$ à la valeur centrale (champ étalon).

Pour la même dimension de côté ou pour le même diamètre, des **bobines** de Helmholtz permettent de produire des régions plus grandes de champs magnétiques presque uniformes, sachant que des **bobines** de Helmholtz carrées garantissent une plus grande uniformité que des **bobines** de Helmholtz circulaires (voir figure A.1). Il est possible d'obtenir l'équation des champs magnétiques produits par deux **bobines** carrées, en utilisant l'équation (7) et le principe de superposition [50]. La condition nécessaire pour des **bobines** de Helmholtz carrées est d'avoir un espacement entre les **bobines** égal à $0,5445 \times 2a$, où $2a$ est la dimension du côté [16].

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

NOTE – Bien que l'on puisse observer une **réponse en fréquence** uniforme aussi bien avec un **détecteur de moyenne (efficace) redressée** et un **détecteur de valeur efficace vraie**, il est possible que la réponse du détecteur de valeur moyenne (efficace) redressée à une forme d'onde de champ magnétique complexe, composée de la fréquence fondamentale et d'une ou plusieurs harmoniques, soit encore erronée.

The derivation of equation (7) assumes that the conductors in the current loop have negligible cross-sections. It is noted for reference purposes that

$$B_z = \frac{\mu_0 IN\sqrt{2}}{\pi a} \quad (8)$$

at the centre of a square loop of side dimension $2a$. Equation (7) has been used to calculate the field values at and near the centre of a square loop of dimensions $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. The percentage departure from the central magnetic field value at nearby points in the plane of the loop and at $0,03 \text{ m}$ above and below the plane of the loop (in parentheses) are plotted in figure A.3. Also shown in figure A.3 is a scale drawing of a magnetic field probe $0,10 \text{ m}$ in diameter. The departure of the magnetic field from the central value over the cross-sectional area of the $0,10 \text{ m}$ probe is less than 1% . Figure A.4 shows a schematic view of the probe, square calibration loop, and associated circuit for energizing the coils.

NOTE – The uncertainty (**coverage factor 1**) in the value of the calibration field is determined by the uncertainties associated with calculating B_z . For example, in the case of a $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ square loop (see figures A.3 and A.4), the uncertainty is due to uncertainties in the measured current I , the side dimension of the loop, and the effect of non-uniformity of the magnetic field ($<0,5 \%$ for a $0,10 \text{ m}$ diameter probe). The uncertainty in the side dimension of the square loop can be due to a non-negligible conductor bundle cross-section. The side dimension may be taken to be the distance between the centres of the conductor bundles with an uncertainty equal to \pm the conductor bundle "diameter" (see figure A.4). The combined uncertainty in the value of the magnetic flux density is given by the square root of the sum-of-the-squares. If, for example, uncertainties in the determination of I and side dimension are $\pm 0,2 \%$ and $\pm 1,0 \%$, respectively, the combined uncertainty in the value of the calibration field for the $0,10 \text{ m}$ diameter probe is $\pm[(0,2)^2 + (1,0)^2 + (0,5)^2]^{1/2}$ or $\pm 1,1 \%$ (**coverage factor 1**).

It is noteworthy that a field meter with a **coil probe** will indicate a magnetic field value that is an average over the cross-sectional area of the probe. The difference between this average and the central value [see equation (8)] will be less than the maximum percentage departure from the central value. For example, while the largest departure of the magnetic field from the central value is $0,63 \%$ for the $0,10 \text{ m}$ probe (in the plane of the loop), the average field is only $0,31 \%$ more than the central (calibration field) value.

For the same side dimension or diameter, larger regions of nearly uniform magnetic fields can be produced using Helmholtz coils, with square Helmholtz coils providing greater uniformity than circular Helmholtz coils (see figure A.1). The equation for magnetic fields produced by two square coils can be derived using equation (7) and the principle of superposition [50]. The necessary condition for square Helmholtz coils is that the spacing between the coils is equal to $0,5445 \times 2a$, where $2a$ is the side dimension of the coil system [16].

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

NOTE – While a flat **frequency response** may be observed with both a **rectified average (r.m.s.) detector** and a **true r.m.s. detector**, the response of the **rectified average (r.m.s.) detector** to a complex magnetic field waveform, consisting of the fundamental and one or more harmonics, may still be in error.

L'étalonnage des échelles supérieures d'un capteur de champ magnétique, c'est-à-dire $>10 \mu\text{T}$, peut normalement être effectué avec un champ produit par un système de **bobines**, parce que des champs parasites ambiants qui sont typiquement égaux ou inférieurs à $0,1 \mu\text{T}$ contribuent de façon négligeable au champ étalon. Cependant, la présence de champs parasites ambiants est susceptible de compromettre l'étalonnage des échelles les plus sensibles, en raison des effets perturbateurs de ces champs parasites sur le champ étalon. Il est possible d'utiliser également la procédure d'étalonnage des plages sensibles par une technique d'injection de tension [18].

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

NOTE – En raison des contraintes introduites par la conception de l'instrument, il est possible que la méthode d'étalonnage par injection de tension ne soit applicable que pendant la phase de conception (**essais de type**) ou pendant la phase de fabrication (**essais de réception**) du capteur de champ.

Cette procédure permet de déterminer les volts/tesla produits par une **bobine** (lorsqu'elle est reliée au circuit détecteur) à chaque fréquence étudiée, en utilisant un voltmètre relié à l'entrée du détecteur et un champ magnétique qui est supérieur, par au moins deux ordres de grandeur, au champ parasite ambiant. Des tensions correspondant à des champs magnétiques faibles sont alors injectées dans le circuit du détecteur (après avoir déconnecté la sonde) pour étalonner les échelles les plus sensibles du capteur. Il est possible d'utiliser un diviseur de tension ayant un rapport connu lorsqu'il est relié au détecteur, une source de tension alternative (par exemple un générateur de fonctions), un voltmètre précis, et un blindage de champ électrique pour injecter les tensions connues pour la plage de fréquences étudiée [18]. Pour effectuer l'étalonnage, il convient également de connaître l'évolution du rapport de division vis-à-vis de la fréquence. La figure A.5 donne une vue schématique d'un circuit d'injection de tension relié au détecteur.

Il est possible que la technique d'injection de tension ne soit pas applicable à des sondes à noyaux ferromagnétiques parce que la perméabilité du noyau peut varier en fonction de l'induction magnétique et affecter la sensibilité de la sonde (volts/tesla). Il convient de noter que la technique d'injection de tension peut également être utilisée comme un moyen pour vérifier l'étalonnage de toutes les plages du capteur de champ magnétique (voir 5.2.4).

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

D'autre part, le capteur de champ magnétique de référence peut servir à vérifier la calibration d'un système de **bobines** utilisé à des fins d'étalonnage.

NOTE – Des comparaisons entre les lectures du capteur de champ magnétique et les valeurs du champ étalon permettent de déterminer des **facteurs de correction** qui devraient être appliqués aux lectures lors des mesures. Autrement, les comparaisons permettent des ajustements correctifs dans le circuit détecteur. Dans les deux cas, l'incertitude associée aux procédés d'étalonnage ci-dessus est égale à l'**incertitude de mesure** dans la valeur du champ étalon (une fois les corrections effectuées) combinée à des incertitudes liées à la stabilité et à la résolution des lectures du capteur de champ.

Calibration of the higher scales of a magnetic field meter, i.e. $>10 \mu\text{T}$, can usually be performed with a field generated by a coil system because background fields that are typically $0,1 \mu\text{T}$ or less make a negligible contribution to the calibration field. However, the presence of background fields can prevent calibration of the more sensitive scales because of their perturbing effects on the calibration field. An alternative procedure for calibrating the sensitive scales is to use the voltage injection technique [18].

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

NOTE – Because of constraints introduced by instrument design, the voltage injection calibration method may only be applicable during the design stage (**type tests**) or manufacturing stage (**acceptance tests**) of the field meter.

Using this procedure, the volts/tesla produced by a **coil probe** (when connected to the detector circuit) can be determined at each frequency of interest, using a voltmeter connected to the input of the detector and a magnetic field that is at least two orders of magnitude larger than the background field. Voltages that correspond to smaller magnetic fields are then injected into the detector circuit (with the probe disconnected) to calibrate the more sensitive scales of the magnetic field meter. A voltage divider with a well-known ratio when connected to the detector, an a.c. voltage source (e.g. a function generator), an accurate voltmeter, and adequate electric field shielding can be used to inject the known voltages for the frequency range of interest [18]. The frequency dependence of the voltage divider ratio should also be known in order to carry out the calibration. Figure A.5 shows a schematic view of a voltage injection circuit connected to the detector.

The voltage injection approach may not be applicable to probes with ferromagnetic cores because the permeability of the core may vary with the magnetic flux density and affect the probe sensitivity (volts/tesla). It should be noted that the voltage injection technique can also be used as a means of verifying the calibration of all ranges of the magnetic field meter (see 5.2.4).

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

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

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

Des perturbations du champ étalon peuvent être produites par l'image des boucles de courant dans des plans du sol situés à proximité. Par exemple, lorsque le plan d'une boucle carrée est parallèle à un sol parfait, la perturbation du champ au centre de la boucle est de 2 % et 0,3 % respectivement pour des distances égales à une fois et à deux fois le côté de la boucle carrée. La perturbation est réduite lorsque le plan de la boucle est perpendiculaire au plan du sol, par exemple la perturbation pour la boucle carrée est de 0,3 % lorsque le côté de la boucle est éloigné du sol d'une distance égale au côté de la boucle. La perturbation du champ étalon est moindre pour des **bobines** de Helmholtz carrées [17].

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

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

A.2 Etalonnage des capteurs de champ électrique

A des fins d'étalonnage, des champs électriques presque uniformes peuvent être générés au moyen de plaques parallèles, à condition que les dimensions des plaques soient suffisamment grandes par rapport à l'espace séparant les plaques [3], [27], [65]. Si l'on ignore les effets de bords, la valeur du champ électrique uniforme E_0 est donnée par V/d où V est la différence de potentiel appliquée entre les plaques et d est l'espace séparant les plaques. Afin d'aider à la détermination des dimensions des plaques parallèles, on trace la courbe de la variation de l'amplitude du champ électrique calculé E , et normalisées par rapport au champ uniforme (E/E_0) à la surface des plaques et à mi-distance entre les plaques, en fonction de la distance normalisée x/d à partir du bord de la plaque, comme illustré à la figure A.6. Des valeurs numériques sont présentées au tableau A.1.

Les résultats figurant au tableau A.1 montrent que l'écart sur l'uniformité du champ, dû aux effets de bord, décroît jusqu'à 0,1 % à une distance par rapport au bord, égale à l'espacement entre les plaques. En ce qui concerne les plaques carrées de dimensions finies, l'influence des effets de bord, pour l'ensemble des quatre bords, peut être estimée en utilisant le principe de superposition lorsque l'effet par rapport à un bord est inférieur à 0,1 %. Les calculs numériques du champ, entre des plaques parallèles de dimensions finies, suggèrent un écart de 0,04 % lorsqu'on utilise cette méthode [65]. Ces résultats sont valables en l'absence de perturbations provenant de plans du sol situés à proximité. Des calculs et des mesures [36], [65] indiquent que la mise sous tension des plaques parallèles, au moyen d'un transformateur à point milieu, permet d'obtenir un champ qui est moins sensible aux perturbations provoquées par des plans de sol situés à proximité.

La figure A.7 illustre un système de plaques parallèles qui s'est avéré adéquat pour étalonner des **capteurs d'espace libre** présentant des dimensions diagonales inférieures à 0,23 m [22], [27]. Pour réaliser les plaques parallèles, on utilise des feuilles métalliques ou un écran

Perturbations of the calibration field can be produced by image current loops in nearby ground planes. For example, when the plane of a square loop is parallel to a *perfect* ground plane, the perturbation of the field at the centre of the loop is 2 % and 0,3 % for distances of one and two loop-side dimensions, respectively. The perturbation is reduced when the plane of the loop is perpendicular to the ground plane, e.g. the perturbation for the square loop is 0,3 % when the side of the loop is one side dimension away from the ground plane. Perturbation of the calibration field is less for square Helmholtz coils [17].

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

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

A.2 Calibration of electric field strength meters

Nearly uniform electric fields may be produced for calibration purposes with parallel plates, provided that the dimensions of the plates are sufficiently large relative to the plate spacing [3], [27], [65]. Ignoring edge effects, the uniform field value E_0 is given by V/d where V is the applied potential difference across the plates and d is the plate spacing. As a guide for determining parallel plate dimensions, the calculated magnitudes of the electric field strength E , normalized by the uniform field (E/E_0) at the plate surface and midway between the plates, are plotted as a function of normalized distance x/d from the plate edge as shown in figure A.6. Numerical values are presented in table A.1.

The results in table A.1 show that the departure from field uniformity due to fringing fields decreases to 0,1 % at a distance of one plate spacing from the edge. For square plates of finite size, the effect of the fringing fields from the four edges may be estimated using the principle of superposition when the effect from one edge is less than 0,1 %. Numerical calculations of the field between finite size parallel plates suggests a discrepancy of 0,04 % using this approach [65]. These results are valid in the absence of perturbations from nearby ground planes. Calculations and measurements [36], [65] indicate that energization of the parallel plates with a centre-tapped transformer provides a field that is more immune to perturbations due to nearby ground planes.

A parallel plates system that has been proven suitable for calibrations of **free-body meters** with diagonal dimensions less than 0,23 m is shown in figure A.7 [22], [27]. Metal sheets or a tightly stretched metal screen on frames of 1,5 m × 1,5 m, and a separation of 0,75 m are used

métallique fortement tendu sur des cadres de 1,5 m × 1,5 m, et un écartement de 0,75 m. Les plaques sont mises sous tension par un ensemble constitué d'un générateur de fonctions, d'un amplificateur de puissance et d'un transformateur, sachant que des résistances de limitation de courant adéquates sont placées aux bornes de sortie du transformateur par mesure de sécurité [57]. Par exemple, des résistances de 10 MΩ et plus, prévues pour des tensions nominales adéquates, sont efficaces jusqu'à 10 kV (c'est-à-dire $E \approx 13$ kV/m). Lorsque les travaux sont effectués en présence de hautes tensions, il convient de respecter les consignes de sécurité normalement en usage dans les laboratoires utilisant des hautes tensions. Un champ étalon compris dans des limites de 1 % par rapport à la valeur du champ uniforme V/d est produit au centre du système de plaques parallèles décrit plus haut (il convient de combiner les incertitudes dans les valeurs de V et d avec le taux de 1 %). Le **capteur d'espace libre**, muni de la poignée isolante normalement utilisée pendant les mesures, est placé au centre du système de plaques parallèles.

Pour éviter des perturbations significatives des distributions de charges superficielles sur les plaques parallèles, dues à la présence du capteur de champ, il est souhaitable que la plus grande dimension diagonale du capteur ne soit pas supérieure à 0,23 m [44]. En outre, il est souhaitable que la distance séparant les plaques parallèles du plan du sol le plus proche (murs, plancher, etc.) soit au moins égale à 0,5 m.

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

Le système de plaques parallèles peut être réduit ou augmenté, selon qu'il s'agit respectivement de capteurs de plus grandes dimensions ou de capteurs de plus petites dimensions.

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

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

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

to form the parallel plates. The plates are energized with a function generator/power amplifier/transformer combination which have adequate current-limiting resistors in the transformer output leads as a safety measure [57]. For example, 10 MΩ and larger resistors of adequate voltage rating are satisfactory up to 10 kV (i.e. $E \approx 13$ kV/m). Normal high-voltage laboratory safety practices should be followed when working with high voltages. A calibration field that is within 1 % of the uniform field value, V/d , is produced at the centre of the parallel plates system described above (uncertainties in the values of V and d should be combined with the 1 %). The **free-body meter** is positioned at the centre of the parallel plates system with the insulating handle normally used during measurements.

To avoid significant perturbations of the surface charge distributions on the parallel plates due to the presence of the field meter, the largest diagonal dimension of the meter should not be greater than 0,23 m [44]. In addition, the distance from the parallel plates to the nearest ground plane (walls, floor, etc.) should be 0,5 m or more. The parallel plates system may be scaled upwards or downwards for larger or smaller field meters.

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

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

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

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

Il est également possible d'étalonner des **capteurs électro-optiques** de champs électriques dans un système à plaques parallèles, le système de plaques parallèles pouvant être réduit pour les dimensions plus faibles de la sonde électro-optique.

Pour étalonner des capteurs de champ de type **capteur de paroi**, le montage utilisé pour mettre sous tension les plaques parallèles, tel qu'illustré à la figure A.7, est modifié de telle sorte que la plaque inférieure se trouve au potentiel de la terre et qu'elle serve de support à la sonde plate. En raison de la distance plus importante entre la sonde et la plaque supérieure, la perturbation de distribution des charges superficielles sur la plaque supérieure par la sonde est considérablement réduite (par rapport à des **capteurs d'espace libre** placés à mi-distance entre les plaques). Cette perturbation plus faible permet de réduire l'espacement entre les plaques parallèles précédemment indiqué (0,75 m) et, de ce fait, permet d'augmenter l'extension latérale de la région du champ presque uniforme (se reporter à la figure A.6 et au tableau A.1). Il est souhaitable que la distance entre les plaques parallèles ne soit pas supérieure à 1,5 fois la dimension de la sonde et que la distance entre la sonde et n'importe quel bord de la plaque inférieure ne soit pas inférieure à deux fois la distance entre les plaques. Il est souhaitable que la distance séparant les plaques parallèles du plan du sol le plus proche (murs, plancher, etc.) soit supérieure au double de la distance séparant les deux plaques. Il est souhaitable que la largeur de la bande de garde soit au moins égale à 6 % de la dimension du côté et que l'épaisseur de la sonde ne soit pas supérieure à 3,5 % de la dimension de son côté. Avec les limitations indiquées plus haut, la valeur du champ étalon est égale, avec une tolérance de 0,5 %, à la valeur du champ uniforme, V/d (il convient de combiner les incertitudes dans les valeurs de V et d avec les 0,5 %) [43].

NOTE – Des comparaisons entre les lectures du capteur de champ électrique et les valeurs du champ étalon permettent de déterminer des **facteurs de correction** qui devraient être appliqués aux lectures lors des mesures. Autrement, les comparaisons permettent des ajustements correctifs dans le circuit détecteur. Dans les deux cas, l'incertitude associée aux procédés d'étalonnage ci-dessus est égale à l'incertitude dans les valeurs du champ étalon (une fois les corrections effectuées) combinée à des incertitudes liées à la stabilité et à la résolution des lectures du capteur de champ.

Les **capteurs d'espace libre** et les **capteurs de paroi**, dans leur réponse initiale à un champ électrique, peuvent être considérés comme des mesureurs de courant¹⁾. Par conséquent, si le rapport du courant induit au champ électrique, I/E , pour un capteur de champ électrique, est déterminé par étalonnage, il est possible d'utiliser ultérieurement une méthode d'injection de courant comme un moyen permettant de vérifier l'étalonnage des instruments, si on ne dispose pas de plaques parallèles [36]. La figure A.8 montre un circuit pouvant servir à injecter des courants connus dans les électrodes actives d'un capteur de type **capteur d'espace libre**. Dans la figure A.8, V est la tension produite par un générateur de fonctions et Z est une impédance connue supérieure d'au moins deux ordres de grandeur à l'impédance d'entrée du capteur de champ. Bien que Z puisse être réalisé à l'aide de condensateurs et de résistances, il est préférable d'utiliser des résistances, car l'impédance des condensateurs varie si l'on utilise la technique d'injection de courant à différentes fréquences. De plus, si la source de tension contient des harmoniques, des erreurs plus petites seront introduites par l'utilisation de résistances. Le courant injecté peut être calculé à partir de la loi d'Ohm.

Il est possible d'utiliser un circuit similaire à celui illustré à la figure A.8 pour injecter des courants dans des capteurs de champ de type **capteurs de paroi**. Dans ce cas, on supprime l'impédance du côté terre de la source de tension et on double la valeur de l'impédance restante.

Lorsque la technique d'injection de courant est employée, il est nécessaire d'utiliser un blindage approprié pour minimiser les contributions des signaux provenant de sources telles que des appareils d'éclairage et des appareils électriques situés à proximité. Le fait de protéger le circuit d'injection de courant et le capteur de champ par un écran métallique mis à la terre peut réduire, au point de les rendre négligeables, les contributions des signaux provenant de sources parasites. La validité de la méthode d'injection de courant suppose que

¹⁾ Par la suite, s'il y a une étape d'intégration dans le circuit détecteur, la lecture du capteur de champ est proportionnelle à la charge induite qui suit la forme d'onde du champ électrique.

Electro-optic electric field meters can also be calibrated in a parallel plates system; the parallel plates system may be scaled downwards for the smaller dimensions of the electro-optic probe.

For calibrations of **ground reference** type field **meters**, the arrangement designed to energize the parallel plates as shown in figure A.7 is modified so that the bottom plate is at ground potential and is used as a support for the flat probe. Because of the increased distance between the probe and top plate, the perturbation of the surface charge distribution on the top plate by the probe is greatly reduced (compared with **free-body meters** midway between the plates). This decreased perturbation permits reduction of the parallel plate spacing previously indicated (0,75 m) and thereby increases the lateral extent of the nearly uniform field region (see figure A.6 and table A.1). The parallel plate spacing should be no larger than 1,5 times the side dimension of the probe, and the edges of the probe should be no closer than two plate spacings to any edge of the bottom plate. The distance between the parallel plates and the nearest ground plane (walls, floor, etc.) should be greater than two plate spacings. The guard band should be at least as wide as 6 % of the side dimension and the thickness of the probe should not exceed 3,5 % of its side dimension. With the above restrictions the calibration field will be within 0,5 % of the uniform field value V/d (uncertainties in the values of V and d should be combined with the 0,5 %) [43].

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

Free-body and **ground reference** field **meters**, in their initial response to an electric field, can be considered as current measuring devices¹⁾. Therefore, if the ratio of induced current to electric field I/E for an electric field meter is determined by calibration, a current injection scheme may be used later as a means for verifying the instrument calibration if parallel plates are unavailable [36]. Figure A.8 shows a circuit that can be used for injecting known currents into the sensing electrodes of a **free-body**-type **meter**. In figure A.8, V is the voltage produced by a function generator and Z is a known impedance at least two orders of magnitude greater than the input impedance of the field meter. Although Z may consist of capacitors or resistors, resistors are preferred because the impedance of capacitors will change when the current injection technique is used at different frequencies. Further, if there are harmonics in the voltage source, smaller errors will be introduced with the use of resistors. The injected current can be calculated from Ohm's law.

A circuit similar to the one shown in figure A.8 may be used for injecting currents into **ground-reference**-type field **meters**. In this case, the impedance on the ground side of the voltage source is removed and the remaining impedance is doubled in value.

Adequate shielding is required when the current injection technique is employed in order to minimize signal contributions from such sources as nearby lighting and electrical equipment. Enclosing the current injection circuit and field meter with a grounded metal screen can reduce the signal contributions from background sources to negligible levels. The validity of the current

¹⁾ Afterwards, if there is a stage of integration in the detector circuit, the field meter reading will be proportional to the induced charge which tracks the waveform of the electric field.

injection approach assumes that the ratio V/E is determined soon after calibration of the field meter in a known electric field and that the field meter probe has not been modified since its calibration.

If electrical connections can be made to the Pockels crystal in the **electro-optic**-type field **meter**, a voltage injection technique may be used to verify the calibration of the meter once it has been calibrated in a known field. The voltage injection circuit for Pockels-type electric field meters should be similar to the one shown in figure B.8, but with the impedances removed.

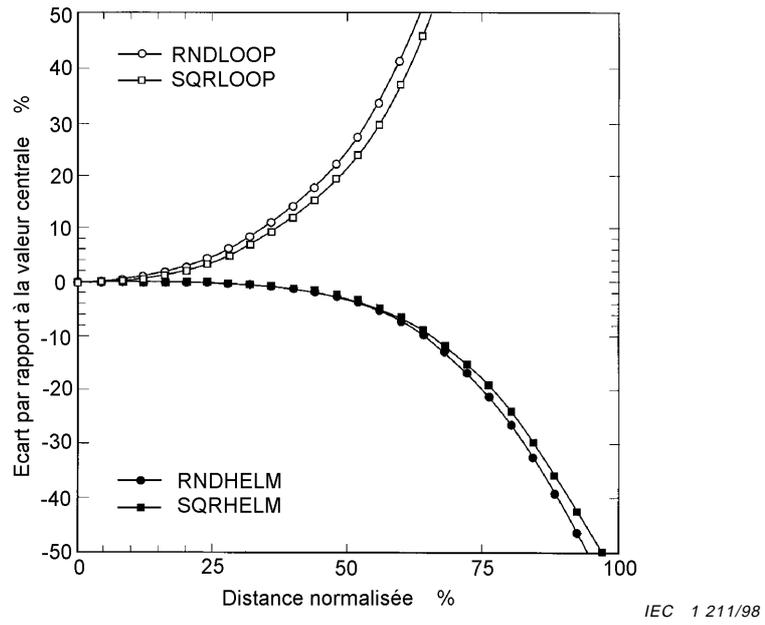


Figure A.1 – Ecart en pourcentage entre le champ axial calculé et la valeur centrale de ce champ pour une boucle ronde unique, une boucle carrée unique, une bobine Helmholtz ronde, et une bobine Helmholtz carrée, en fonction de la distance normalisée par rapport au centre du système de bobines en pourcentage, d'après Frix *et al.* [17]

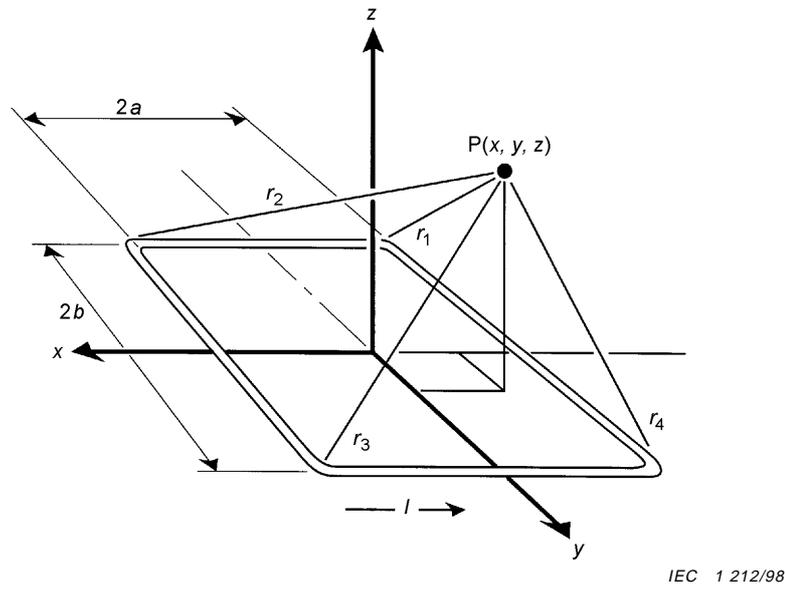
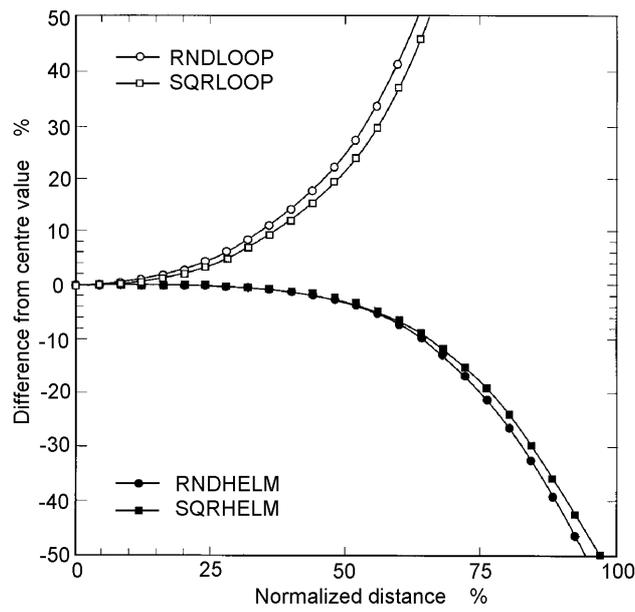
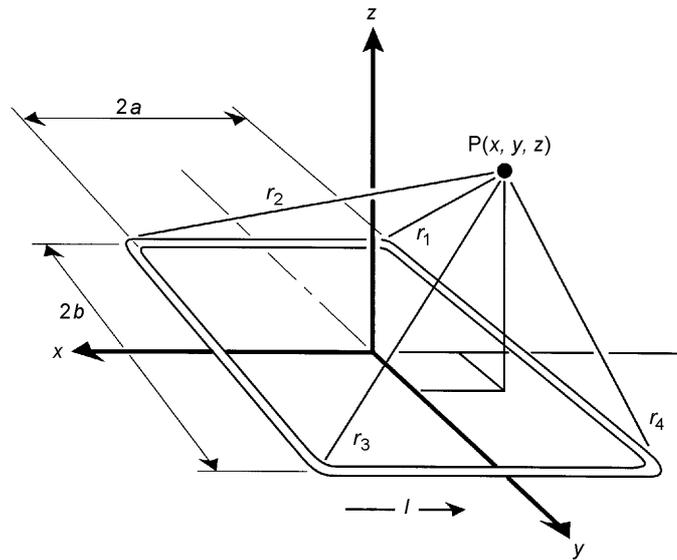


Figure A.2 – Système de coordonnées et géométrie d'une boucle rectangulaire constituée de plusieurs tours de fil, pour l'équation (7)



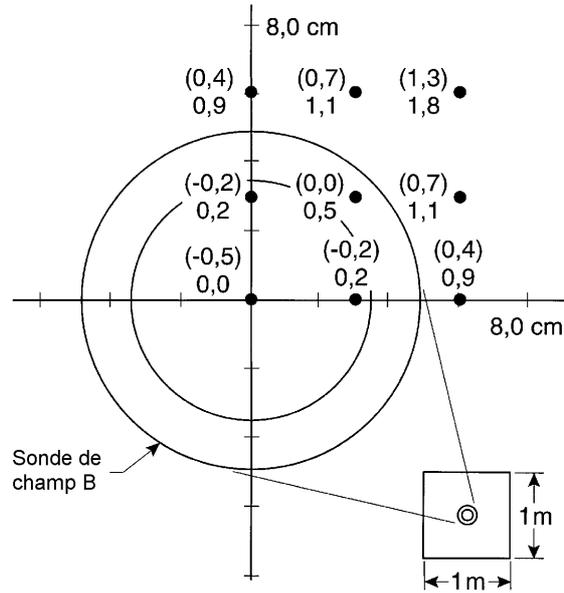
IEC 1 211/98

Figure A.1 – Percentage departure of calculated axial field from centre value for a single round loop, a single square loop, a round Helmholtz coil, and a square Helmholtz coil, as a function of the normalized distance from the centre of the coil system, as a percentage, after Frix *et al.* [17]



IEC 1 212/98

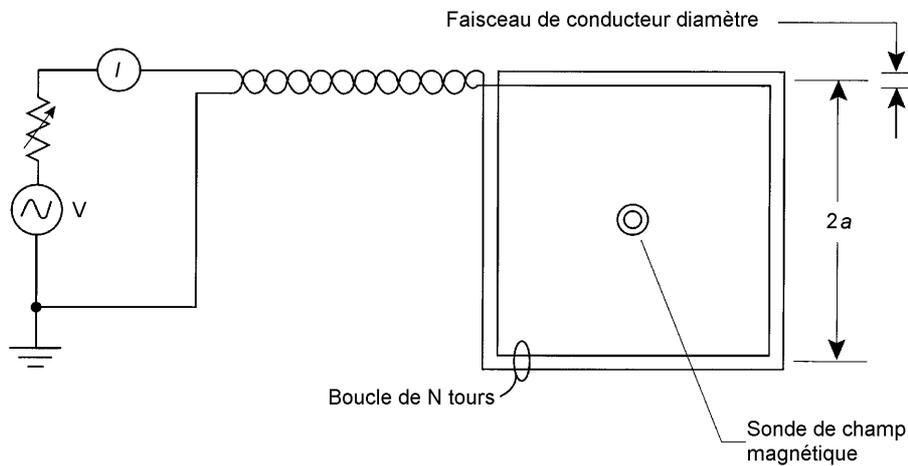
Figure A.2 – Coordinate system and geometry of rectangular loop of many turns of wire (see equation (7))



IEC 1 213/98

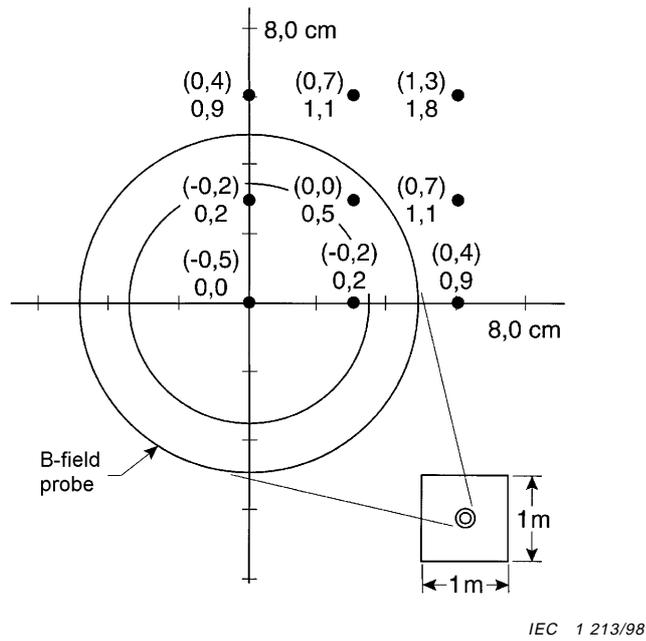
La figure montre un dessin à l'échelle d'une bobine de 0,10 m de diamètre.

Figure A.3 – Ecart en pourcentage entre la valeur calculée B_z et la valeur centrale [équation (8)]



IEC 1 214/98

Figure A.4 – Représentation schématique d'un circuit utilisé pour l'étalonnage d'un capteur de champ magnétique employant une boucle carrée pour produire un champ connu



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

Figure A.3 – Percentage departure of calculated B_z from centre value (see equation (8))

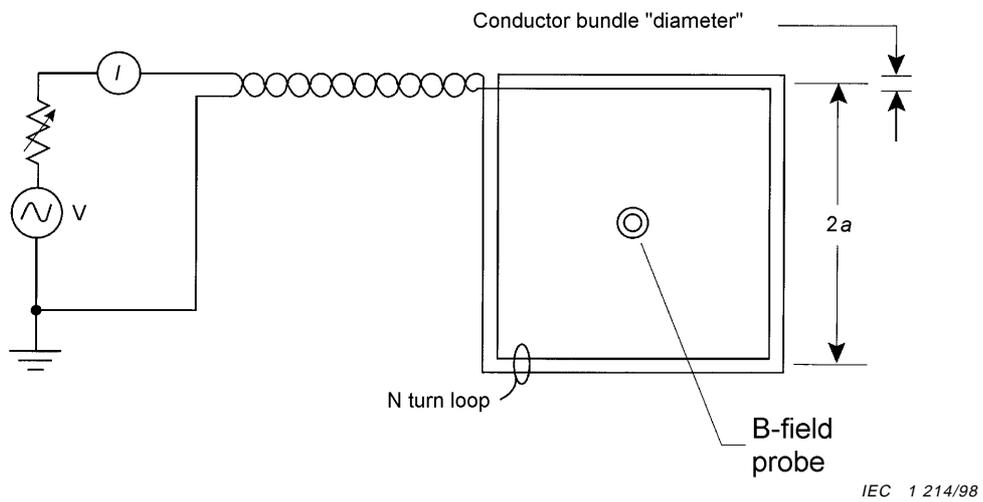
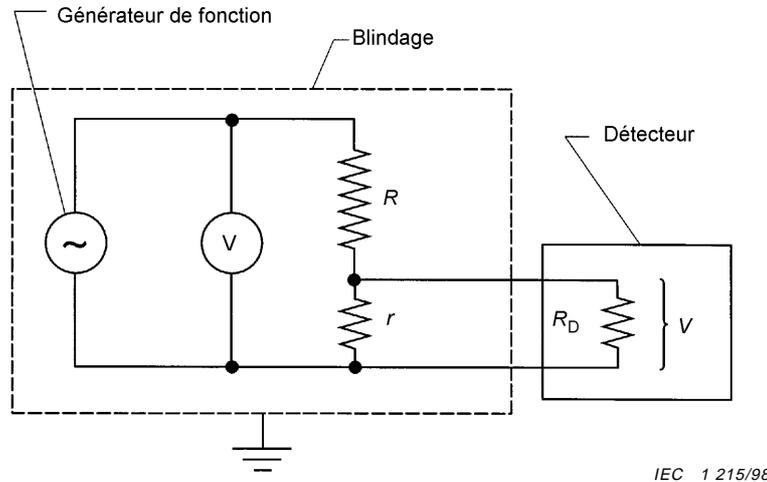


Figure A.4 – Schematic view of a circuit for calibration of magnetic field meter using a square loop to produce a known field



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

Figure A.5 – Schéma relatif à une technique d'injection de tension

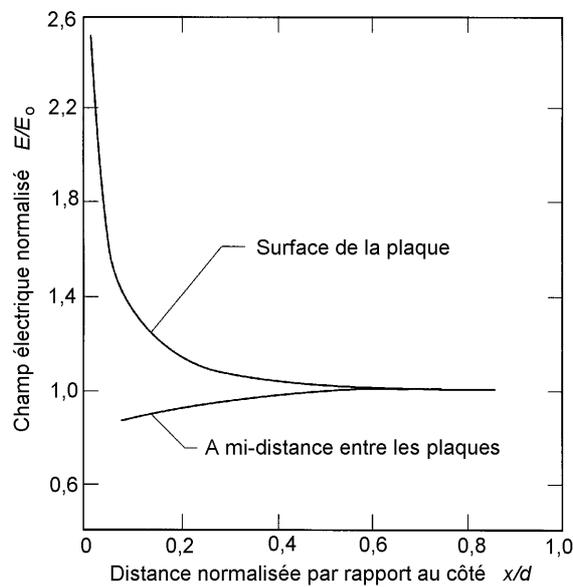
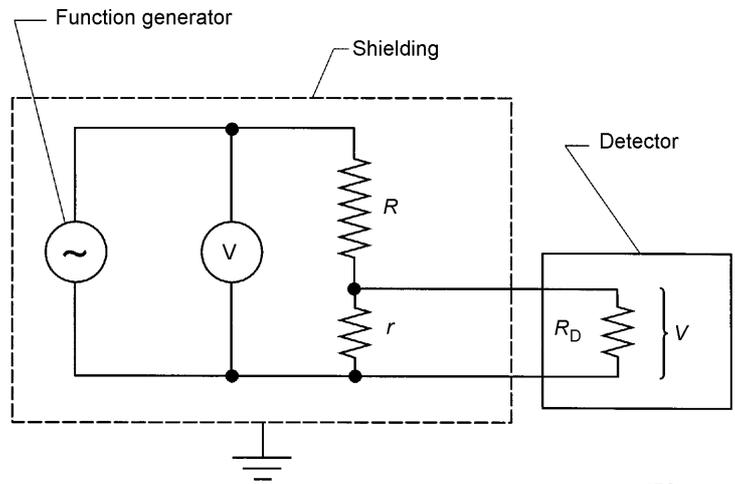


Figure A.6 – Champ électrique calculé normalisé au niveau des surfaces des plaques et à mi-distance entre les plaques, en fonction de la distance normalisée par rapport aux bords des plaques



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

Figure A.5 – Diagram for voltage injection technique

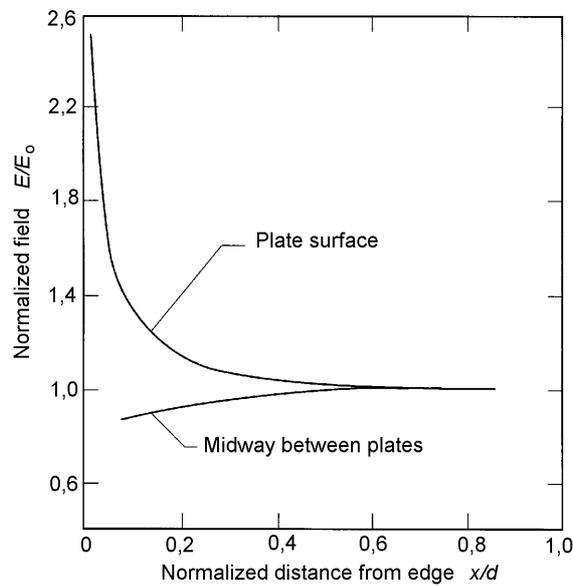


Figure A.6 – Calculated normalized electric field at plate surfaces and midway between plates as a function of the normalized distance from the edge of the plate

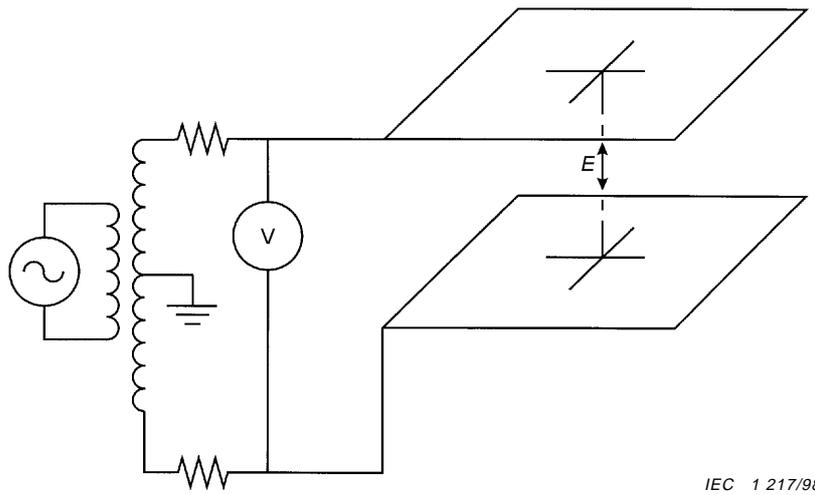
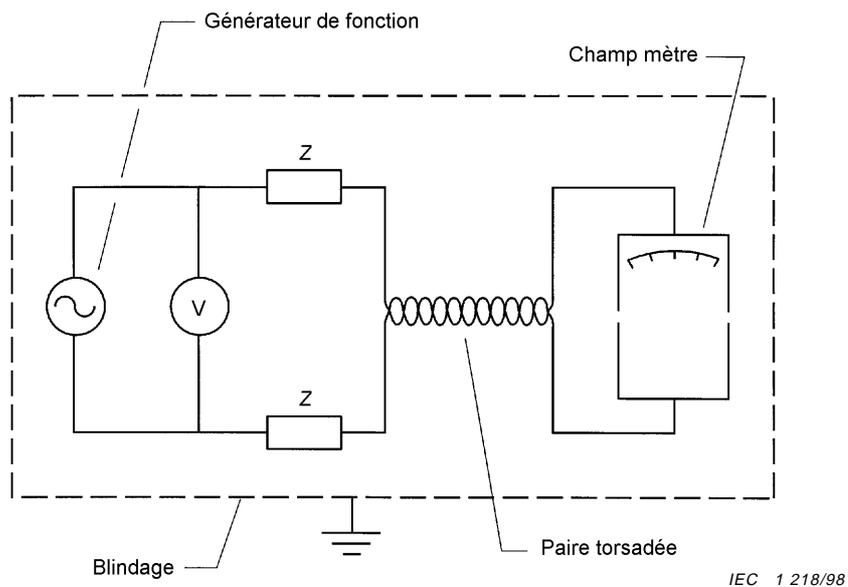


Figure A.7 – Système de plaques parallèles utilisées pour l'étalonnage de capteurs de champ électrique de type capteurs d'espace libre et capteurs Pockels



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

Figure A.8 – Schéma relatif à la technique d'injection de courant

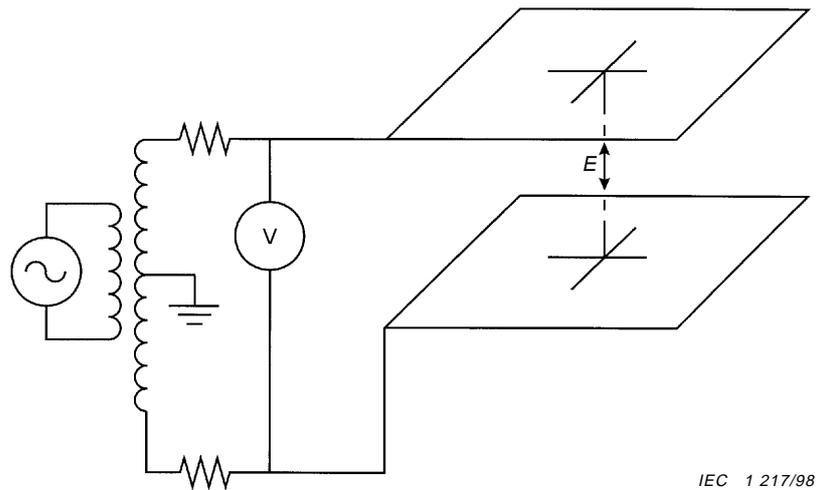
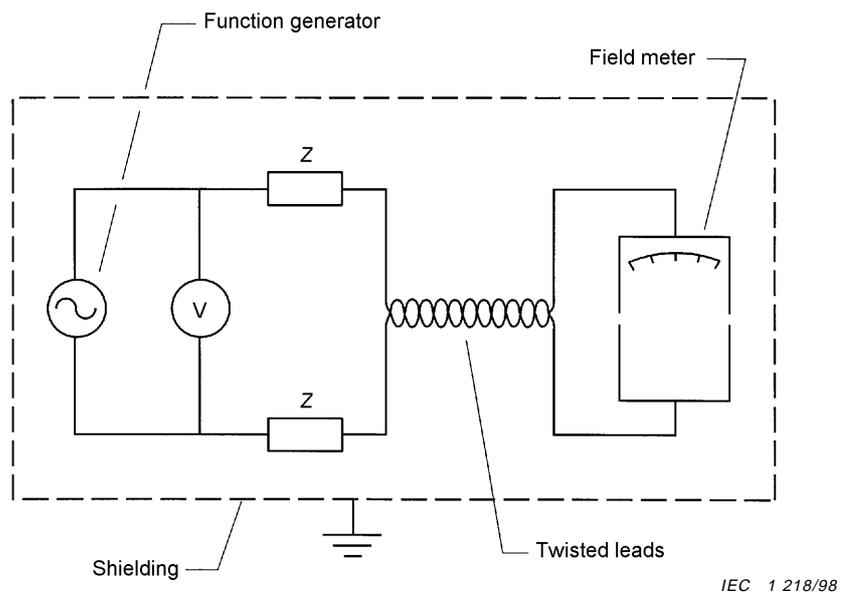


Figure A.7 – Parallel plates system for calibrating free-body and Pockels-type electric field meters



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

Figure A.8 – Diagram for current injection technique

Annexe B (normative)

Sources d'incertitude de mesure

B.1 Incertitudes sur la mesure de l'induction magnétique

Lorsqu'un capteur de champ magnétique a été correctement étalonné, le nombre de mécanismes susceptibles d'introduire des erreurs de mesure est faible. Il convient de doter la **bobine** et le détecteur d'un blindage de protection adéquat (par exemple contre les champs électriques à fréquence industrielle et aux fréquences radioélectriques), mais les effets de proximité liés à la présence de l'observateur sont négligeables. Les sources d'incertitude indiquées ci-après sont des sources d'incertitude qu'il convient d'étudier et de combiner, le cas échéant, avec les incertitudes d'étalonnage.

NOTE – Dans certains cas indiqués aux articles B.1 et B.2, des estimations quantitatives des incertitudes sont fournies (par exemple les effets de champs non uniformes), alors que dans d'autres, une directive succincte est donnée pour sa détermination (soit les effets de la température). Pour d'autres sources d'incertitudes, on se limite à attirer l'attention sur leurs influences potentielles.

B.1.1 Champ magnétique non uniforme

Les incertitudes les plus élevées apparaissent lors de mesures manuelles de champs magnétiques particulièrement non uniformes à proximité de sources telles que des appareils électriques. Des sondes tri-axiales qui n'ont pas de centre commun, par exemple dans les **dosimètres**, mesurent le champ en différents endroits (voir B.1.2). Les incertitudes sur l'orientation de sondes mono-axiales (par exemple lors de la mesure du **champ magnétique maximal**) et la distance entre la source et la sonde peuvent donner des résultats de mesure qui diffèrent de plus de 100 % [24]. En outre, les sondes du capteur de champ magnétique sont normalement étalonnées dans un champ magnétique pratiquement uniforme et sont utilisées pour mesurer un champ qui peut varier suivant $(\text{distance})^{-3}$ (voir annexe C). Alors que le centre de la sonde est habituellement considéré comme l'emplacement de la mesure, la lecture du champ magnétique est, en réalité, une valeur moyenne de la composante normale du champ magnétique sur toute la section transversale de la sonde. Dans certains cas, la valeur moyenne du champ peut être très différente de la valeur du champ central. Enfin, lorsque la sonde tourne dans un champ particulièrement non uniforme, les lectures peuvent s'écarter de manière significative selon la loi du cosinus. Cet écart de la loi du cosinus est susceptible d'affecter les mesures, lorsqu'on utilise des sondes mono-axiales et tri-axiales.

Il est possible de réduire les incertitudes en assurant un positionnement plus précis de la sonde de champs magnétiques avec des orientations bien définies. Pour cela il est possible d'utiliser des supports réglables réalisés à partir de matériaux non conducteurs (voir B.1.10). La relation entre le champ magnétique au centre d'une bobine circulaire et l'induction magnétique moyenne peut être calculée en fonction du rapport entre la distance r à partir de la source de champs magnétiques et le rayon de la sonde a . Le tableau B.1 indique, en fonction de r/a , la plus grande différence calculée entre le champ magnétique au point situé à proximité d'un appareil électrique, en pourcentage, et la valeur moyenne du champ magnétique déterminé en faisant tourner une sonde mono-axiale autour du même point jusqu'à ce que soit obtenue une lecture maximale $\Delta B_{\max 1}$ [46].

On considère un dipôle magnétique pour les calculs car il est assez représentatif d'un grand nombre d'applications domestiques et d'équipements [39]. L'approximation du dipôle suppose que le champ magnétique dépend d'une $(\text{distance})^{-3}$, ce qui n'est pas rigoureusement vrai à proximité de certains appareils. Le signe moins dans le tableau B.1 indique que la mesure maximale est inférieure à la valeur du champ magnétique au centre de la sonde.

Annex B (normative)

Sources of measurement uncertainty

B.1 Measurement uncertainty of magnetic flux density

Once a valid calibration of a magnetic field meter has been performed, the number of mechanisms that can cause measurement errors is small. The **coil probe** and detector should have adequate electrical shielding (e.g. against power frequency and radio frequency electric fields), but observer proximity effects are negligible. Sources of uncertainty that should be considered and combined with calibration uncertainties, when appropriate, are given below.

NOTE – In some cases in clauses B.1 and B.2, 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 still other uncertainty sources, attention only is directed to their possible influences.

B.1.1 Non-uniform magnetic 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 (see B.1.2). Uncertainties in the orientation of single-axis probes (e.g. when measuring the **maximum magnetic field**) and the distance between the source and probe can lead to measurement results that differ by more than 100 % [24]. 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 (distance)⁻³ (see annex C). 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. Finally, as the probe is rotated in a highly non-uniform field, the readings can depart significantly from the cosine law. This departure from the cosine law can affect field measurements carried out with single and three-axis probes.

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 (see B.1.10). The relationship between the magnetic field at the centre of a circular **coil probe** and the average magnetic flux density can be calculated as a function of the ratio of distance r from the magnetic field source and probe radius a . Table B.1 shows, as a function of r/a , the largest calculated difference, in percentage form, between the magnetic field at a point near an appliance and the average magnetic field value determined by rotating a single-axis probe at the same point until a maximum reading $\Delta B_{\max 1}$ is obtained [46].

A dipole magnetic field is assumed for the calculations because, to a good approximation, its geometry simulates the geometry of many electrical appliances and equipment [39]. The dipole approximation assumes a (distance)⁻³ dependence of the magnetic field, which may not be exactly true close to some appliances. The minus sign in table B.1 indicates that the maximum measurement will be less than the magnetic field value at the centre of the probe.

NOTE – En général, l'axe du dipôle magnétique a une orientation inconnue lors d'une mesure. Par conséquent, les calculs et les résultats indiqués dans [46] ont tenu compte des différentes orientations du dipôle magnétique pour un rapport r/a fixe, jusqu'à ce que soit déterminée la plus grande différence entre le champ magnétique au centre de la sonde et le champ magnétique moyen maximal.

Le tableau B.1 indique aussi, en fonction de r/a , les plus grandes différences possibles $\Delta B_{\max 3}$ [46] en pourcentage, entre la valeur du champ magnétique au centre d'une sonde tri-axiale (avec un point central commun) et le **champ magnétique résultant** obtenu par sommation «vectorielle» des valeurs moyennes (valeurs efficaces) du champ magnétique à partir de trois **bobines** orientées orthogonalement [46]. Les valeurs de $\Delta B_{\max 3}$ sont les plus grandes différences, calculées après des rotations arbitraires, de la sonde tri-axiale et pour différentes orientations du dipôle magnétique [46].

Il convient de se reporter aux informations figurant au tableau B.1 lors de la prise en compte des diverses sources d'**incertitude de mesure**. Par exemple, si l'on doit mesurer le **champ magnétique maximal** à une distance r d'un appareil, à l'aide d'une sonde mono-axiale ayant un rayon a tel que $r/a = 5$, le champ mesuré maximal pourrait s'avérer trop faible, par quelque 5,7 %, parce que l'orientation du dipôle magnétique est habituellement inconnue. Bien que cette incertitude ne puisse pas servir à corriger des mesures, il est possible de la combiner avec d'autres sources d'incertitude telle que la calibration, la largeur de bande, etc., en tant que contribution la plus défavorable à l'incertitude totale.

Tableau B.1 – Valeurs de $\Delta B_{\max 1}$ (sonde mono-axiale) et $\Delta B_{\max 3}$ (sonde tri-axiale) en fonction d'une distance normalisée r/a par rapport à un dipôle magnétique

r/a	$\Delta B_{\max 1}$ %	$\Delta B_{\max 3}$ %
3	-14,6	-19,6
4	-8,7	-10,8
5	-5,7	-6,9
6	-4,0	-4,8
7	-3,0	-3,5
8	-2,3	-2,7
9	-1,8	-2,1
10	-1,5	-1,7
11	-1,2	-1,4
12	-1,0	-1,2
13	-0,9	-1,0
14	-0,8	-0,9
15	-0,7	-0,8

Par ailleurs, les informations données au tableau B.1 pour des capteurs de champ tri-axiaux ne peuvent pas servir à corriger des lectures lors des mesures parce que les orientations du dipôle magnétique et la sonde tri-axiale ne sont pas connues dans la plupart des situations de mesure. De ce fait, les entrées pour $\Delta B_{\max 3}$ au tableau B.1 peuvent être considérées comme les erreurs de mesure calculées les plus élevées en fonction de r/a en raison des effets du moyennage des trois **bobines**.

NOTE – In general, the magnetic dipole axis has an unknown orientation during a measurement situation. Therefore, the calculations and results in [46] have considered different orientations of the magnetic dipole for a fixed ratio of r/a , until the largest difference between the magnetic field at the probe's centre and the maximum average magnetic field was determined.

Table B.1 also shows as a function of r/a , the largest differences as a percentage that are possible between the magnetic field value at the centre of a three-axis probe (with a common central point) and the **resultant magnetic field** obtained by "vectorially" summing the average (r.m.s.) magnetic field values from three orthogonally-oriented circular **coil probes** $\Delta B_{\max 3}$ [46]. The values of $\Delta B_{\max 3}$ are the largest differences, calculated following arbitrary rotations, of the three-axis probe and for different orientations of the magnetic dipole [46].

The information given in table B.1 should be taken into account when considering the various sources of **measurement uncertainty**. For example, if the **maximum magnetic field** at a distance r from an appliance is to be measured with a single-axis probe which has a radius a such that $r/a = 5$, the maximum measured field could be too low by as much as 5,7 % because the orientation of the magnetic dipole is typically unknown. While this uncertainty cannot be used to correct measurements, it may be combined with other sources such as calibration, bandwidth, etc., as a worst case contribution to the total uncertainty.

Table B.1 – Values of $\Delta B_{\max 1}$ (single-axis probe) and $\Delta B_{\max 3}$ (three-axis probe) as a function of normalized distance r/a from a magnetic dipole

r/a	$\Delta B_{\max 1}$ %	$\Delta B_{\max 3}$ %
3	-14,6	-19,6
4	-8,7	-10,8
5	-5,7	-6,9
6	-4,0	-4,8
7	-3,0	-3,5
8	-2,3	-2,7
9	-1,8	-2,1
10	-1,5	-1,7
11	-1,2	-1,4
12	-1,0	-1,2
13	-0,9	-1,0
14	-0,8	-0,9
15	-0,7	-0,8

The information given in table B.1 for three-axis field meters cannot be used to correct readings because the orientations of the magnetic dipole and three-axis probe are not known in most measurement situations. Thus, the entries for $\Delta B_{\max 3}$ in table B.1 may be regarded as the largest measurement errors computed as a function of r/a because of averaging effects of the three-**coil probes**.

Il convient de tenir compte des valeurs de $\Delta B_{\max 3}$ lors de la détermination de l'**incertitude de mesure** totale. Par exemple, si le **champ magnétique résultant** doit être mesuré à une distance r par rapport à un appareil avec un écart-type inférieur à 10 %, il convient de considérer que le capteur de champ magnétique, muni de sondes tri-axiales ayant des rayons a tels que $r/a = 3$, n'est pas adapté. Des sondes tri-axiales, ayant des rayons tels que $r/a = 5$, sont raisonnablement considérées comme adéquates si l'écart-type combiné, par rapport à d'autres sources, est égal ou inférieur à 3 %, c'est-à-dire $6,9 + 3,0 = 9,9$, où la valeur 6,9 est prise dans le tableau B.1 pour $r/a = 5$. Les estimations de l'incertitude associée aux mesures du **champ magnétique résultant** en raison des effets du moyennage (**facteurs de couverture** 1 et 2), sont également décrites dans la documentation technique [47].

B.1.2 Séparation des capteurs (sonde tri-axiale)

On peut s'attendre à ce que des capteurs tri-axiaux, qui sont munis de sondes placées en des endroits très rapprochés mais différents, présentent une certaine marge d'erreur dans des champs extrêmement non uniformes. En outre, si les **bobines** ont des noyaux ferromagnétiques destinés à en améliorer la sensibilité, il est possible qu'il soit nécessaire de trouver un certain compromis dans le positionnement des trois sondes orientées orthogonalement. Si les sondes sont trop rapprochées, la proximité des noyaux ferromagnétiques est susceptible de perturber le champ magnétique et le champ axial capté par chaque sonde. Si les sondes sont placées dans des endroits éloignés les uns des autres pour réduire l'effet de proximité des noyaux ferromagnétiques, il est possible qu'une erreur soit introduite dans le cas de champs extrêmement non uniformes, comme mentionné plus haut.

B.1.3 Proximité de piles

Une autre source d'incertitude apparaît si des piles alimentant le circuit détecteur se trouvent au voisinage immédiat de **bobines**, comme cela peut être le cas dans les exposimètres de faibles dimensions. Il se peut que les enveloppes métalliques des piles soient en matériau ferromagnétique et qu'elles déforment le champ magnétique capté par les sondes. Par exemple, si le capteur de champ est étalonné avec des piles ayant des enveloppes ferromagnétiques, l'étalonnage pourrait s'avérer incorrect si des piles munies d'enveloppes non magnétiques sont utilisées par la suite.

B.1.4 Palier de bruit

Le bruit électrique dans le circuit détecteur peut engendrer un palier de bruit qui empêche d'effectuer des mesures précises de champs magnétiques à des niveaux de champs plus faibles. Il est possible d'évaluer le palier de bruit par des mesures réalisées loin des sources de champs magnétiques (par exemple au milieu d'un champ ouvert).

B.1.5 Bandes passantes limitées

Une **bande passante** limitée peut contribuer à l'**incertitude de mesure** et entraîner des différences dans les résultats de mesure. Par exemple, la mesure de champs magnétiques provenant de certains écrans de visualisation (VDTs) à l'aide d'un capteur de champ à 60 Hz (c'est-à-dire un capteur de champ avec une **bande passante** étroite centrée autour de 60 Hz) peuvent différer de plus de 20 % par rapport aux mesures effectuées à l'aide d'un capteur de champ ayant des **bandes passantes** plus larges [25]. Cela est dû au fait que le champ magnétique généré par les écrans de visualisation est riche en harmoniques et que ces dernières ne peuvent être détectées au moyen d'un capteur à 60 Hz. Si le champ magnétique ne contient aucune composante à la fréquence industrielle, la différence ou l'erreur pourrait être encore beaucoup plus importante.

NOTE – Pour minimiser les signaux engendrés par le déplacement de la sonde dans le champ magnétique terrestre, la fréquence de coupure haute du filtre du circuit détecteur peut être augmentée, à condition que la fréquence plus élevée ne compromette pas les mesures, par exemple mesures de champs magnétiques de $16^{2/3}$ Hz et de 25 Hz générés par certains trains électriques.

The values of $\Delta B_{\max 3}$ should be considered when determining total **measurement uncertainty**. For example, if the **resultant magnetic field** is to be measured at a distance r from an appliance with a standard deviation of less than 10 %, magnetic field meters with three-axis probes which have radii a such that $r/a = 3$ should be considered unsuitable. Three-axis probes having radii such that $r/a = 5$ are conservatively considered suitable if the combined standard deviation from other sources amounts to 3 % or less, i.e. $6,9 + 3,0 = 9,9$, where 6,9 is taken from table B.1 for $r/a = 5$. Estimates of uncertainty associated with **resultant magnetic field** measurements because of averaging effects (**coverage factors 1 and 2**) are also described in the technical literature [47].

B.1.2 Separation of sensors (three-axis probe)

Three-axis meters that have probes in close proximity but at different locations can be expected to exhibit a margin of error in highly non-uniform fields. In addition, if the **coil probes** have ferromagnetic cores for enhanced sensitivity, some compromise may be necessary in the placement of the three orthogonally oriented probes. If the probes are too close, the proximity of the ferromagnetic cores can perturb the magnetic field and the axial field sensed by each probe. If the probes are placed far apart to reduce the proximity effect of the ferromagnetic cores, a margin of error can occur in highly non-uniform fields, as noted above.

B.1.3 Proximity of batteries

Another source of uncertainty occurs if batteries that drive the detector circuit are in close proximity to **coil probes**, as is possible in the small confines of exposure meters. Metal jackets for batteries may be ferromagnetic and possibly distort the magnetic field sensed by the probes. For example, if the field meter is calibrated with batteries that have ferromagnetic casings, the calibration could be invalidated if batteries with non-magnetic casings were used at a later date.

B.1.4 Noise floor

Electrical noise in the detector circuit can create a noise floor that prevents accurate magnetic field measurements at lower field levels. The noise floor may be estimated by performing measurements far away from magnetic field sources (e.g. in the middle of an open field).

B.1.5 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 60 Hz field meter (i.e. a field meter with a narrow **pass-band** centred about 60 Hz), can differ by more than 20 % compared with measurements performed using field meters with broader **pass-bands** [25]. This occurs because the VDT magnetic field is rich in harmonics that cannot be detected with a 60 Hz meter. If the magnetic field contains no power frequency component, the difference or error could be much larger.

NOTE – 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.

B.1.6 Température

L'influence de la température sur le fonctionnement du capteur de champ constitue une autre source potentielle d'incertitude. Si l'on prévoit des différences extrêmes de température sur un site de mesure par rapport à la température qui prévalait au moment de l'étalonnage, il convient de connaître ou de caractériser les effets de la température ambiante. L'influence de la température peut être déterminée à l'aide de la technique d'injection de tension, alors que le capteur de champ se trouve dans une enceinte climatique. En observant la réponse du capteur de champ en fonction de la température dans des conditions d'injection de tension constante, il est possible de quantifier la dépendance vis-à-vis de la température.

B.1.7 Humidité

On ne dispose que de peu d'informations sur les effets de l'humidité. Les essais effectués sur un nombre limité de capteurs munis d'un dispositif d'affichage analogique ont démontré que les effets de l'humidité étaient faibles (<1 %), lorsque ces essais ont été réalisés à des taux d'humidité relative compris entre 25 % et 95 % [36]. Pour éviter les effets néfastes de l'humidité, il convient généralement de ne pas utiliser les instruments lorsque la température de l'air atteint le point de rosée (où il se produit un phénomène de condensation), à moins que les instruments soient étanches à l'humidité.

B.1.8 Facteur de crête

Des erreurs peuvent se produire pendant le processus de conversion d'un signal périodique en sa valeur efficace. En général, cette erreur augmente en même temps que le **facteur de crête**. Il est possible de vérifier le fonctionnement de chaque ensemble sonde/détecteur pour une forme d'onde ayant un **facteur de crête** de 3 (voir 5.1.9), soit directement en utilisant un champ magnétique généré par un système de **bobines**, soit en employant une technique d'injection de tension. Si cette dernière méthode est utilisée, il convient de prêter une attention particulière à une éventuelle augmentation du taux d'harmoniques produit par la sonde (voir article D.2). Parmi les exemples de forme d'onde avec un **facteur de crête** de 3, on peut citer celui d'une onde semi-sinusoïdale transmise par impulsion, ayant une durée de 2,8 ms et une fréquence de récurrence de 79 Hz. Selon la conception du circuit détecteur, il est possible que d'autres formes d'ondes soient plus adaptées. Il convient d'effectuer les essais pour un certain nombre de niveaux de champ, afin de s'assurer qu'aucune saturation pour une plage donnée du circuit détecteur n'est masquée.

B.1.9 Immunité électromagnétique

Des champs électromagnétiques, générés par une grande variété de sources, peuvent se coupler involontairement avec des capteurs de champ magnétique (et électriques) en raison d'un blindage inadéquat, et venir ainsi influencer la mesure. Pour les cinq degrés de perturbation et les amplitudes maximales des champs susceptibles d'être générés, E_L , le tableau B.2 fournit la distance d , pour des sources d'alimentation typiques [23]. Les amplitudes maximales des champs susceptibles d'apparaître sont donnés par la relation

$$E_L = 7 \cdot \frac{P^{1/2}}{d} \quad (9)$$

où P est la puissance de l'antenne en émission, en watts.

D'autres informations à propos des sources de fréquences radioélectriques et des sources de fréquences électromagnétiques plus élevées sont données dans les publications [23] et [52].

B.1.6 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 characterized. The influence of temperature may be determined using the voltage injection technique while the field meter is in an environmental chamber. By observing the field meter response as a function of the temperature under conditions of constant voltage injection, the temperature dependence can be quantified.

B.1.7 Humidity

Relatively little published data is available on the effects of humidity. Tests on a limited number of meters with analogue displays have typically shown little humidity effects (<1 %) during tests carried out between 25 % and 95 % relative humidity [36]. To avoid the adverse effects of humidity, instrumentation should, as a rule, not be used when the air temperature reaches the dew point (when condensation occurs) unless the instrumentation has been sealed against moisture.

B.1.8 Crest factor

Errors can occur during the process of converting a periodic signal to its r.m.s. value. In general, this error becomes larger with increasing **crest factor**. The operation of each probe/detector combination for a waveform that has a **crest factor** of 3 (see 5.1.9) may be tested either directly with a magnetic field produced by a coil system or by using a voltage injection technique. If the latter approach is used, proper consideration should be given to any enhancement of harmonics that would be produced by the probe (see clause D.2). An example of a waveform with a **crest factor** of 3 is a gated half-sine wave with a duration of 2,8 ms and a repetition rate of 79 Hz. Depending on the detector circuit design other waveforms may be more suitable. The tests should be carried out at a number of peak field levels to ensure that any saturation for a given range of the detector circuit is not masked.

B.1.9 Electromagnetic immunity

Electromagnetic fields from a variety of sources can couple to magnetic (and electric) field meters unintentionally because of inadequate shielding and thus influence the measurement. Table B.2 provides the distance, d , from typical power sources at which maximum likely fields E_L are at the five disturbance levels [23]. The maximum likely fields are given by the relation

$$E_L = 7 \cdot \frac{P^{1/2}}{d} \quad (9)$$

where P is the power of the radiating antenna in watts.

Further details regarding sources of radio frequency and higher-frequency sources of electromagnetic fields are given in [23] and [52].

Tableau B.2 – Niveaux de champs électriques maximaux susceptibles d’être générés par des sources d'alimentation typiques

Degré de perturbation	E_L effc. V/m	Radiodiffusion AM 150 kHz-30 MHz $P = 500 \text{ kW}$	Walkie-talkie 27 MHz-1000 MHz $P = 5 \text{ W}$	CB 27 MHz $P = 12 \text{ W}$	TV-VHF 48 MHz-223 MHz $P = 200 \text{ kW}$
		$d(m)$	$d(m)$	$d(m)$	$d(m)$
1	0,3	15 650	52	80	9 900
2	1	4 950	16	24	3 130
3	3	1 565	5,2	8	990
4	10	495	1,6	2,4	313
5	30	156	0,5	0,8	99

B.1.10 Zone de mesure

Des **incertitudes de mesure** peuvent apparaître au cours des mesures de champs magnétiques (et électriques) non uniformes, à cause de l'incertitude liée à la zone où est effectuée la mesure. La variation du champ mesuré B en fonction de la distance r peut être décrite suivant la relation

$$B = B_c \left(\frac{1}{r^\alpha} \right) \tag{10}$$

où

$1 \leq \alpha \leq 3$ pour la plupart des cas (voir annexe C);

B_c est une constante, c'est-à-dire que le champ magnétique alternatif a une valeur efficace constante.

Le calcul de la différentielle de l'équation (10) par rapport à r conduit à

$$\partial B = B \left(-\frac{\alpha}{r} \right) \partial r \tag{11}$$

En supposant une distribution rectangulaire pour l'incertitude sur r , il est possible de démontrer l'écart-type dans la valeur de B , s_d , en raison des incertitudes sur r (Δr) sous la forme

$$s_d = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \frac{\Delta r}{r} B \tag{12}$$

Par exemple, si on suppose une source de champs magnétiques de dipôle ($\alpha = 3$), $\Delta r = 2 \text{ mm}$, et $r = 500 \text{ mm}$, $s_d = 0,007B$.

B.1.11 Dérive dans le temps

En raison des variations progressives dans le temps des composants des instruments, il est possible que des variations se produisent dans la réponse d'un capteur de champs. Une vérification périodique de l'étalonnage (voir 5.2.4) constitue un moyen permettant de déterminer l'étendue des dérives dans le temps et les **facteurs de correction**.

Table B.2 – Likely maximum electric field levels from typical sources and operating power

Degree of disturbance	E_L r.m.s.	AM broadcasting 150 kHz-30 MHz $P = 500 \text{ kW}$	Walkie-talkie 27 MHz-1 000 MHz $P = 5 \text{ W}$	CB 27 MHz $P = 12 \text{ W}$	TV-VHF 48 MHz-223 MHz $P = 200 \text{ kW}$
	V/m	$d(\text{m})$	$d(\text{m})$	$d(\text{m})$	$d(\text{m})$
1	0,3	15 650	52	80	9 900
2	1	4 950	16	24	3 130
3	3	1 565	5,2	8	990
4	10	495	1,6	2,4	313
5	30	156	0,5	0,8	99

B.1.10 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

$$B = B_c \left(\frac{1}{r^\alpha} \right) \quad (10)$$

where

$1 \leq \alpha \leq 3$ for most cases (see annex C);

B_c is a constant, i.e. the alternating magnetic field has a constant r.m.s. value.

Differentiating equation (10) with respect to r yields

$$\partial B = B \left(-\frac{\alpha}{r} \right) \partial r \quad (11)$$

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

$$s_d = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \frac{\Delta r}{r} B \quad (12)$$

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

B.1.11 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 5.2.4) provides a means of determining the extent of long-term drifts and **correction factors**.

B.1.12 Constante de temps des instruments

La dernière source d'incertitude qui est examinée concerne celle qui est engendrée par la constante de temps du circuit détecteur. Par exemple, si un capteur muni d'un dispositif d'affichage numérique est lu trop tôt après son installation dans un champ de forte intensité, il est possible que les lectures effectuées soient erronées. Des lectures erronées peuvent également se produire pour des champs fluctuant rapidement en raison d'un temps de traitement inadéquat du signal.

Il convient de faire une distinction entre l'**incertitude de mesure**, qui peut être réduite à une très faible valeur par une conception adéquate et un étalonnage soigné de l'instrument, et la variabilité du champ en raison des variations temporelles et spatiales. Les variations temporelles et spatiales du champ peuvent être largement supérieures aux incertitudes d'une mesure; ces variations sont traitées à l'article D.3.

B.2 Incertitude sur la mesure des champs électriques

Si on les compare au cas du capteur de champ magnétique, les sources d'incertitude apparaissant pendant les mesures de champs électriques sont nombreuses, notamment pour les **capteurs d'espace libre** sans dispositif d'affichage à distance. Les sources d'incertitudes dont il convient de tenir compte et qu'il convient de combiner avec les incertitudes d'étalonnage, selon le cas approprié, sont données ci-dessous.

B.2.1 Effet de proximité de l'observateur

La proximité d'un observateur pendant des mesures de champs électriques peut exercer une influence significative pour certaines géométries. Les effets de proximité de l'observateur lors de mesures effectuées dans un environnement variant lentement, c'est-à-dire un champ électrique vertical à peu près uniforme pour des **capteurs d'espace libre**, ont été calculés et mesurés, et sont indiqués à la figure B.1. La figure B.1 montre la perturbation sur 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 capteur de champ au-dessus du niveau du sol [14], [49]. Les points représentent des perturbations mesurées au-dessous d'une ligne de transport d'énergie de 500 kV et engendrées par un observateur relié à la terre, ayant une taille de 1,80 m (bras le long du corps). Les courbes en traits pleins sont des prévisions théoriques. Etant donné que le potentiel de l'observateur est souvent voisin du potentiel de la terre, en raison de la résistance de fuite et de la capacité à la terre, les effets de proximité illustrés à la figure B.1 peuvent être considérés comme caractéristiques.

Il est possible de déterminer expérimentalement les effets de proximité de l'observateur pour des **capteurs d'espace libre** dans d'autres configurations géométriques, qui peuvent être supérieures ou inférieures à celles indiquées à la figure B.1, en installant le capteur de champ sur une colonne verticale isolante, telle qu'illustrée à la figure B.2. Des essais effectués à l'aide des colonnes verticales en verre, avec cette configuration géométrique, démontrent que la présence de la colonne n'affecte pas de manière significative la mesure (on s'attend à obtenir des résultats similaires avec d'autres matériaux isolants propres et secs). Il est possible de déterminer l'effet de proximité en notant les variations de la valeur du champ en fonction de la distance de l'observateur par rapport au centre de la sonde. Le capteur de champs à dispositif d'affichage numérique ou analogique est orienté de manière à permettre à l'observateur de lire les valeurs en toute sécurité pendant les essais. L'agencement illustré à la figure B.2 peut également servir de technique de mesure dans des situations où la configuration géométrique du champ n'est pas bien connue. Par exemple, cela pourrait permettre de savoir si l'observateur s'est interposé entre une électrode éloignée sous tension et le capteur de champ.

B.1.12 Instrument time constant

A final source of uncertainty which is considered 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 D.3.

B.2 Measurement uncertainty of electric field strength

Compared to the magnetic field meter case, the sources of uncertainty during the measurement of electric fields are many, particularly for **free-body meters** without remote displays. Sources of uncertainty that should be considered and combined with the calibration uncertainties, when appropriate, are given below.

B.2.1 Proximity effect of observer

The proximity of an observer during electric field strength measurements can be very significant for certain geometries. Observer proximity effects during measurements in a slowly changing, i.e. approximately uniform, vertical electric field for **free-body meters**, have been calculated and measured, and are shown in figure B.1. Figure B.1 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 [14], [49]. The data points represent measured perturbations beneath a 500 kV transmission line due to a 1,80 m tall grounded observer (arms at side). 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 B.1 can be regarded as typical.

The observer proximity effects for **free-body meters** in other geometries, which may be greater or less than those shown in figure B.1, can be determined experimentally by supporting the field meter handle on a vertical insulating column, as shown in figure B.2. Tests employing vertical glass columns with this geometry demonstrate that the presence of the column does not significantly affect the measurement (similar results are expected with other insulating materials that are clean and dry). 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. The field meter digital or analogue display is oriented so that the observer is able to view it safely during the tests. The arrangement shown in figure B.2 may also be used as a measurement technique in situations where the field geometry is not well known. For example, it could reveal whether the observer had come between a distant energized electrode and the field meter.

B.2.2 Erreurs de lecture (capteurs d'espace libre munis d'un dispositif d'affichage analogique)

En raison des influences significatives des effets de proximité de l'observateur, dans certaines situations de mesure (par exemple à proximité de lignes d'alimentation aériennes), il est possible qu'un observateur soit tenu de maintenir une distance de plus de 2 m par rapport à la sonde [22], [27]. Si le capteur utilisé est un **capteur d'espace libre** muni d'un dispositif d'affichage analogique, il apparaîtra une **incertitude de mesure** due à la lecture du dispositif d'affichage à une certaine distance. Il est possible d'évaluer cette **incertitude de mesure** en demandant à un second observateur placé loin de la sonde de déterminer simultanément la lecture du champ à l'aide de jumelles. Le remplacement d'un dispositif analogique par un dispositif numérique peut, dans certains cas, réduire les erreurs de lecture. Les capteurs de champ de type **capteur de paroi**, capteurs à effet Pockels et certains **capteurs d'espace libre** sont normalement munis de circuits détecteurs préalablement éloignés de la zone où se trouve la sonde et ne sont donc pas susceptibles d'engendrer des erreurs de lecture.

B.2.3 Effets de proximité des plans conducteurs (capteurs d'espace libre)

Compte tenu des interactions susceptibles de se produire entre la sonde d'un capteur de champ et les distributions des charges superficielles présentes sur des surfaces conductrices situées à proximité, la mesure du champ électrique peut être fortement perturbée si la sonde est amenée à une distance trop proche de la surface. Les calculs montrent que, pour une sonde sphérique, cette perturbation est réduite à environ 0,5 % lorsque la distance entre un plan du sol et le centre de la sonde est égale à trois fois le rayon de la sonde [8]. Par conséquent, on ne s'attend pas à ce qu'une sonde sphérique présente une erreur de mesure significative, si une distance égale au double du diamètre de la sonde est maintenu entre la sonde et les surfaces conductrices. Dans le cas d'une sonde de forme rectangulaire, le diamètre peut être raisonnablement estimé comme étant égal à la plus grande diagonale de la sonde.

B.2.4 Asymétrie dans la conception de la sonde

La présence d'asymétries dans la conception de la sonde d'un capteur de champ électrique peut entraîner une modification de la direction de l'axe électrique (axe présentant la plus grande sensibilité électrique) par rapport à l'axe géométrique. Des mesures effectuées à l'aide d'un tel instrument peuvent être plus ou moins sensibles aux effets de proximité de l'observateur [36]. Dans de tels cas, il convient de quantifier l'effet de proximité de l'observateur avant d'utiliser le capteur de champ pour les mesures.

B.2.5 Inclinaison du capteur de champ (capteurs d'espace libre munis d'un dispositif d'affichage analogique)

Le déséquilibre mécanique d'un dispositif d'affichage analogique peut constituer une source d'incertitude. Si le dispositif n'est pas suffisamment bien équilibré, il convient d'utiliser le capteur dans la même orientation par rapport à l'axe vertical que l'orientation existant pendant l'étalonnage. Il est possible de faire une estimation de l'importance de ce type d'erreur en faisant tourner le capteur dans un environnement exempt de tout champ électrique et en observant le déplacement de l'aiguille. Il est possible de réduire l'erreur de mesure due au déséquilibre mécanique en effectuant une autre mesure après avoir fait tourner la sonde de 180° (autour d'un axe perpendiculaire à la face du capteur) et en calculant la moyenne des deux mesures. Cette procédure peut être utilisée si les axes géométrique et électrique coïncident. Le remplacement d'un dispositif d'affichage analogique par un dispositif d'affichage numérique éliminera des incertitudes dues au mauvais équilibre mécanique.

La réponse d'un capteur de champ électrique muni d'un dispositif d'affichage analogique au même courant induit peut dépendre de l'orientation du capteur, même si ce dispositif est équilibré au point de vue mécanique. Cet effet peut constituer une source d'**incertitude de mesure** si le capteur de champ électrique est utilisé dans une orientation différente de celle

B.2.2 Reading errors (free-body meters with analogue displays)

Because of significant observer proximity effects during certain measurement situations (e.g. near overhead power lines), an observer may be required to maintain a distance of more than 2 m from the probe [22], [27]. If a **free-body meter** with an analogue display is being used, some uncertainty will result due to reading the display from a distance. Estimates of this uncertainty may be made by having a second observer far from the probe simultaneously determine the field reading using binoculars. Replacement of an analogue display with a digital display can reduce reading errors in some cases. Ground reference and Pockels effect field meters, as well as some **free-body meters**, normally have detector circuits well removed from the location of the probe and are thus not expected to lead to reading errors.

B.2.3 Proximity effects of conducting planes (free-body meters)

Because of interactions that can occur between the field meter probe and surface charge distributions on nearby conducting surfaces, the electric field measurement can be significantly perturbed if the probe is brought too close to the surface. Calculations show that this perturbation for a spherical probe is reduced to near 0,5 % when the distance between a ground plane and the probe centre is equal to three probe radii [8]. Therefore, a spherical probe is not expected to have significant measurement error if a distance of two-probe diameters is maintained between the probe and conducting surfaces. The diameter of probes with rectangular geometries may be conservatively estimated as the largest diagonal dimension of the probe.

B.2.4 Asymmetry in probe design

Asymmetries in the design of an electric field meter probe can change the direction of the electrical axis (axis with greatest electrical sensitivity) with respect to the geometrical axis. Measurements performed with such an instrument may be more or less immune to observer proximity effects [36]. In such cases, the observer proximity effect should be quantified before the field meter is used for measurements.

B.2.5 Field meter inclination (free-body meters with analogue display)

Mechanical imbalance of an analogue display can be a source of uncertainty. If the movement is not sufficiently well-balanced, the meter should be used in the same orientation with respect to the vertical existing during calibration. An estimate of the magnitude of this type of error may be made by rotating the meter in the absence of an electric field and observing the displacement of the needle. The measurement error due to mechanical imbalance may be reduced by repeating a measurement after rotating the probe 180° (about an axis normal to the face of the meter) and taking the average of the two measurements. This procedure may be used if the geometrical and electrical axes coincide. Replacement of an analogue display with a digital display will eliminate uncertainties due to poor mechanical balance.

The response of an electric field meter with an analogue display to the same induced current may depend on the meter's orientation, even if the meter is mechanically balanced. This effect can be a source of **measurement uncertainty** if the electric field meter is used in an orientation that differs from that used during calibration in a known field. The magnitude of this

utilisée pendant l'étalonnage dans un champ connu. L'amplitude de cette éventuelle source d'incertitude peut être déterminée à l'aide de la technique d'injection de courant (voir article A.2), en faisant tourner le capteur de champ électrique en l'absence de tout champ électrique.

B.2.6 Champs magnétiques ambiants

Etant donné que des champs magnétiques sont habituellement produits en même temps que des champs électriques, il est recommandé que les capteurs de champ électrique soient conçus de manière à ne pas être affectés de façon significative par les champs magnétiques aux niveaux prédits dans un environnement de mesure donné. Les systèmes de **bobines** décrits à l'article A.1, utilisés pour générer des champs magnétiques, peut servir à vérifier l'insensibilité aux champs magnétiques.

B.2.7 Fuite au niveau de la poignée (capteur d'espace libre)

Une fuite électrique, produite par l'intermédiaire d'un observateur relié à la terre, et la contamination superficielle sur la poignée isolante du capteur de champ peut perturber le champ électrique au-delà de la perturbation géométrique normale produite par la sonde électriquement flottante. Pour contrôler la présence d'une fuite au niveau de la poignée du capteur, il convient de placer le capteur de champ électrique en orientant son axe perpendiculairement à la direction d'un champ connu. Une fuite électrique importante risque de donner une lecture non nulle. Une telle lecture, exprimée comme un pourcentage du champ réel, représenterait l'ordre de grandeur de l'incertitude qui peut être engendrée par ce mécanisme. On admet pour ce contrôle que les axes électrique et géométrique coïncident.

B.2.8 Champ électrique non uniforme (capteur d'espace libre)

Bien que les capteurs de champ électrique soient étalonnés dans un champ presque uniforme (voir article A.2), ils peuvent être normalement utilisés avec une petite incertitude pour des mesures effectuées dans des champs non uniformes. Ceci peut être mis en évidence en considérant le courant induit dans une sonde sphérique par un champ électrique particulièrement non uniforme généré par une charge ponctuelle $Q(\omega t)$ dont l'amplitude oscille en fonction d'une pulsation ω . Lorsqu'il n'y a aucun plan de sol à proximité, le courant induit est donné par la relation:

$$I = 3 \pi a^2 \omega \varepsilon_0 E \left[1 - \frac{7}{12} \beta^2 + \frac{11}{24} \beta^4 - \dots \right] \quad (13)$$

où

$$E = Q(\omega t)/4\pi\varepsilon_0 r^2;$$

β est a/r ;

a est le rayon de la sonde sphérique;

r est la distance entre la charge ponctuelle et le centre de la sonde.

L'équation (13) est obtenue en supposant que la sonde est alignée avec la direction du champ électrique.

NOTE – Ce résultat est donné sans dérivation dans [42]. Il peut être facilement dérivé en considérant une sphère conductrice non chargée dans le champ d'une charge ponctuelle et en utilisant la méthode des images.

Si l'on compare l'équation (13) avec des expressions relatives à des courants induits produits par des champs uniformes (voir équations (20) et (22)), on s'aperçoit que le courant induit est identique à celui produit par un champ uniforme ayant une amplitude $Q(\omega t)/4\pi\varepsilon_0 r^2$ si les termes en (a/r) sont ignorés. De ce fait, le courant induit entre les deux moitiés d'un dipôle sphérique, qui est situé en un point dans un champ particulièrement non uniforme généré par une charge ponctuelle, est presque identique au courant induit produit par un champ uniforme d'égale grandeur, si la valeur de r est suffisamment élevée. Par exemple, si le rapport a/r est égal

possible source of uncertainty may be determined using the current injection technique (see clause A.2) while rotating the electric field meter in the absence of an electric field.

B.2.6 Ambient magnetic fields

Because magnetic fields are typically produced at the same time as electric fields, electric field meters should be designed so that they are not significantly affected by magnetic fields at the levels anticipated in a given measurement environment. The coil systems described in clause A.1 for the production of magnetic fields may be used to check for immunity to magnetic fields.

B.2.7 Handle leakage (free-body meter)

Electrical leakage via a grounded observer and surface contamination on the insulating handle of the field meter may perturb the electric field beyond the normal geometric perturbation produced by the electrically floating probe. To check for handle leakage, the electric field meter should be oriented with its axis perpendicular to the direction of a known field. Significant electrical leakage risks would cause a non-zero reading. Such a reading, expressed as a percentage of the actual field, would represent the order of magnitude of the uncertainty that can be caused by this mechanism. It is assumed for this check that the electrical and geometrical axes coincide.

B.2.8 Non-uniform electric field (free-body meter)

Although electric field meters are calibrated in a nearly uniform field (see clause A.2), they may normally be used with small uncertainty for measurements in non-uniform fields. This can be seen by considering the current induced in a spherical probe by a highly non-uniform electric field which is produced by a point charge $Q(\omega t)$ that oscillates in magnitude with angular frequency ω . In the absence of nearby ground planes, the induced current is given by

$$I = 3 \pi a^2 \omega \varepsilon_0 E \left[1 - \frac{7}{12} \beta^2 + \frac{11}{24} \beta^4 - \dots \right] \quad (13)$$

where

$$E = Q(\omega t)/4\pi\varepsilon_0 r^2;$$

β is a/r ;

a is the radius of the spherical probe;

r is the distance between the point charge and the centre of the probe.

Equation (13) is derived by assuming that the probe is aligned with the electric field direction.

NOTE – This result is given without derivation in [42]. It can be readily derived by considering an uncharged conducting sphere in the field of a point charge and using the method of images.

Comparison of equation (13) with expressions for induced currents produced by uniform fields (see equations (20) and (22)) reveals that the induced current is the same as that produced by a uniform field of magnitude $Q(\omega t)/4\pi\varepsilon_0 r^2$ if the terms in a/r are ignored. Thus, the current induced between the two halves of a spherical dipole, that is located at a point in a highly non-uniform field produced by a point charge, is nearly the same as that produced by a uniform field of equal magnitude if r is sufficiently large. For example, if a/r is equal to 0,1, the difference in

à 0,1, la différence entre le courant induit (c'est-à-dire la mesure du champ électrique) produit par un champ uniforme et le courant induit produit par un champ particulièrement non uniforme est inférieure à 1 %. La variation de l'amplitude du champ électrique sur les dimensions de la sphère est donnée par la relation

$$\Delta E/E \approx 4a/r = 0,4$$

On peut observer que l'erreur de mesure reste faible, même lorsque la sonde n'est pas alignée avec la direction du champ électrique [48]. Par conséquent, l'incertitude engendrée par la non-uniformité du champ est négligeable dans bon nombre de cas pratiques. Par ailleurs, les calculs montrent que des sondes en forme de plaques parallèles peuvent être également utilisées pour mesurer des champs électriques non uniformes avec une marge d'erreur faible si le détecteur [48] mesure la différence entre les charges induites ou les courants induits sur les plaques. A des fins de comparaison avec l'équation (13), le rayon des capteurs de champ, ayant des géométries rectangulaires, peut être raisonnablement considéré comme égal à la moitié de la plus grande dimension diagonale.

B.2.9 Humidité

Dans des conditions d'humidité élevée, une couche de condensation superficielle peut apparaître sur certaines parties d'un capteur de champ électrique. La principale source d'incertitude provient de la présence d'une fuite au niveau de la poignée par le biais de l'isolation jusqu'à l'une des électrodes. Si elle est importante, cette fuite entraînera une forte augmentation des courants induits dans la sonde ainsi qu'une forte augmentation sur la lecture résultante du capteur de champs. Une incertitude bien plus faible est associée à la fuite entre les deux électrodes sensibles, ce qui entraînerait une réduction sur la lecture du capteur de champs. Il convient de maintenir le capteur de champs, sa poignée, et son isolation interne dans un état parfaitement propre et sec pour minimiser les erreurs dues aux courants de fuite.

Des sondes électro-optiques, qui sont munies de couches diélectriques, peuvent être également affectées par des conditions d'humidité élevée. Dans ce cas, une couche de condensation superficielle pourrait agir comme une cage de Faraday et atténuer le champ électrique atteignant le cristal de Pockels.

L'influence de l'humidité ambiante sur les performances du capteur de champ peut être déterminée en appliquant la technique d'injection de courant (**capteurs d'espace libre**) ou la technique d'injection de tension (**capteurs électro-optiques**) après avoir placé le capteur de champ dans une enceinte climatique. L'influence de l'humidité est déterminée en surveillant la variation de la réponse du capteur de champ en fonction de l'humidité, alors que le courant (la tension) injecté(e) est maintenu(e) constant(e).

B.2.10 Température

Des essais réalisés en enceinte climatique sur des **capteurs d'espace libre** munis d'un dispositif d'affichage analogique ont montré que la lecture du capteur de champ pouvait varier jusqu'à 8 % sur la plage de température comprise entre 0 °C et 40 °C [36]. Comme dans le cas du capteur de champ magnétique (voir B.1.6), si des différences extrêmes de température sont prévues dans un site de mesure, par rapport à la température qui prévalait au moment de l'étalonnage, il convient de connaître les effets de la température et il peut être nécessaire de les quantifier. La procédure de caractérisation est identique à celle employée pour des capteurs de champ magnétique (voir B.1.6), mais en remplaçant cette fois la technique d'injection de tension par la technique d'injection de courant.

La sensibilité des sondes électro-optiques est également affectée par les variations de température. Des essais effectués avec des cristaux de Pockels, réalisés à partir de $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, montrent que la dépendance vis-à-vis de la température est inférieure à ± 3 % pour la plage de température allant de -15 °C à 70 °C [21]. Cependant, on sait que d'autres cristaux capables de produire l'effet Pockels présentent des coefficients de température plus élevés que ceux présentés par des cristaux de $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, et peuvent, de ce fait, nécessiter une correction pour la température.

induced current (i.e. electric field measurement) produced by a uniform field and a highly non-uniform field is less than 1 %. The change in electric field magnitude over the dimensions of the sphere is given by

$$\Delta E/E \approx 4a/r = 0,4$$

It can be shown that the measurement error remains small even when the probe is not aligned with the electric field direction [48]. Consequently, the uncertainty caused by the non-uniformity of the field will be negligible for many practical cases. Calculations also show that probes in the shape of parallel plates can be used to measure non-uniform electric fields with a small margin of error if the difference in induced charges or induced currents on the plates is measured by the detector [48]. For comparisons with equation (13), the radius of field meters that have rectangular geometries may be conservatively estimated as half the largest diagonal dimension.

B.2.9 Humidity

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.

Electro-optic probes which have dielectric covers may also be adversely affected under high-humidity conditions. As regards this case, a layer of surface condensation could act as a Faraday cage and attenuate the electric field reaching the Pockels crystal.

The influence of ambient humidity on the performance of field meters may be determined by applying the current injection technique (**free-body meters**) or voltage injection technique (**electro-optic meters**) with the field meter in an environmental chamber. The dependence on humidity is determined by monitoring the field meter response as a function of humidity, while holding the injected current (voltage) constant.

B.2.10 Temperature

Environmental chamber tests on **free-body meters** with analogue displays have shown that the field meter reading can change by as much as 8 % over the temperature range 0 °C to 40 °C [36]. As in the case of magnetic field meters (see B.1.6), if extreme differences in ambient temperature are anticipated at a measurement site as compared to the temperature at the time of calibration, the effects of temperature should be known or may need to be quantified. The characterization procedure is the same as for magnetic field meters (see B.1.6) with the voltage injection technique replaced with the current injection technique.

The sensitivity of electro-optic-type probes is also affected by temperature changes. Tests on Pockels crystals made from $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ indicate a temperature dependence of less than ± 3 % for the temperature range -15 °C to 70 °C [21]. However, it is known that other crystals that exhibit the Pockels effect have greater temperature coefficients than $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, and thus may require correction for temperature.

B.2.11 Dérive dans le temps

En raison des variations progressives subies par les composants des instruments dans le temps, il peut se produire des variations dans la réponse du capteur de champ. Une vérification périodique de l'étalonnage (voir 6.2.4) fournit un moyen pour déterminer l'étendue des dérives dans le temps ainsi que les **facteurs de correction** nécessaires.

B.2.12 Immunité électromagnétique

Voir B.1.9 et 5.1.8.

B.2.13 Zone de mesure

Voir B.1.10.

B.2.11 Long-term drift

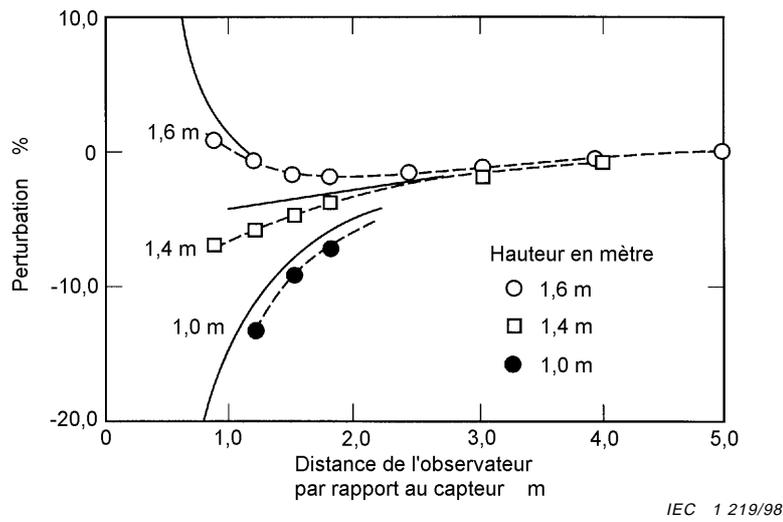
Because of gradual changes in the instrument components over time, changes in field meter response may occur. Periodic verification of the calibration (see 6.2.4) provides a means of determining the extent of long-term drifts as well as the necessary **correction factors**.

B.2.12 Electromagnetic immunity

See in B.1.9 and 5.1.8.

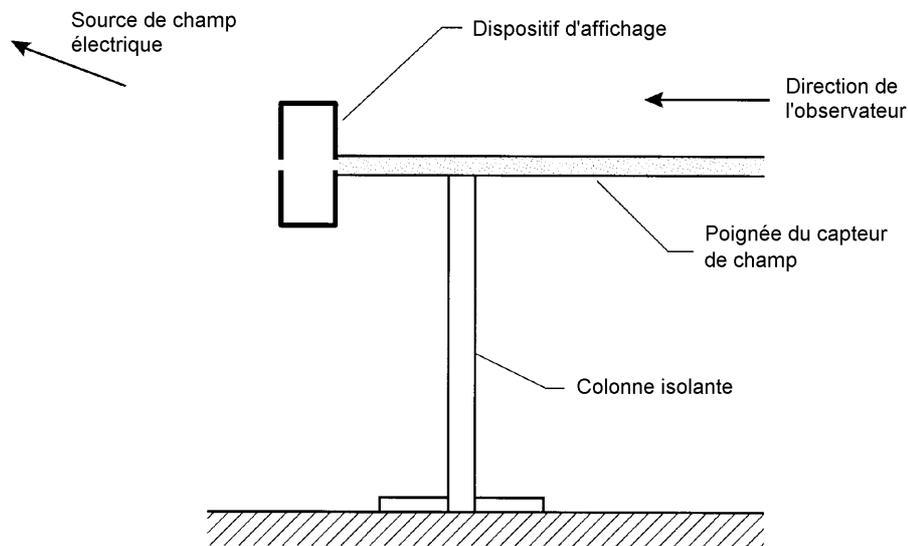
B.2.13 Location of measurement

See in B.1.10.



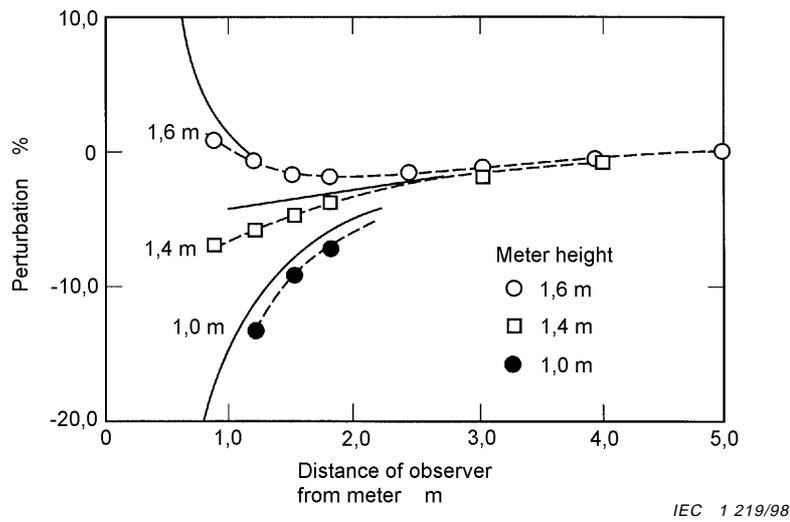
Les courbes représentent des calculs théoriques [14], en supposant un champ électrique uniforme. Les points de mesure concernent un observateur ayant une taille de 1,8 m, relié à la terre et se tenant sous une ligne de transmission de 500 kV. Les effets de proximité sont indiqués pour trois hauteurs du capteur de champ au-dessus du plan du sol.

Figure B.1 – Effets de proximité de l'observateur pendant des mesures de champ électrique dans un champ électrique vertical



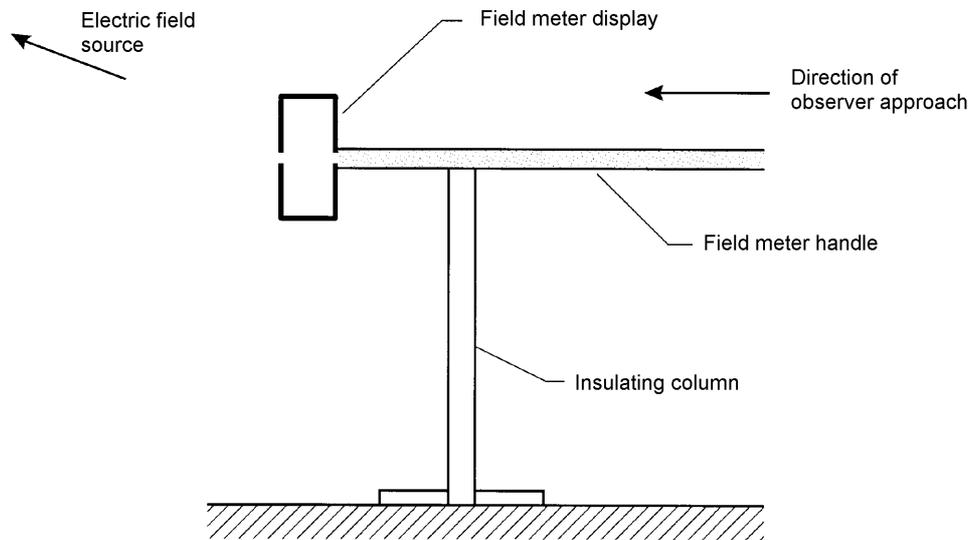
IEC 1 220/98

Figure B.2 – Montage expérimental que l'on peut utiliser pour déterminer les effets de proximité de l'observateur



The curves represent theoretical calculations [14] assuming a uniform electric field. The data points are for a grounded observer 1,8 m tall beneath a 500 kV transmission line. Proximity effects are shown for three heights of the field meter above the ground plane.

Figure B.1 – Observer proximity effects during electric field measurements in vertical electric field



IEC 1 220/98

Figure B.2 – Experimental arrangement which can be used to determine observer proximity effects

Annexe C (informative)

Caractéristiques générales des champs électriques et magnétiques

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

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

Il est possible d'introduire plusieurs des paramètres de champ mentionnés plus haut en considérant le cas des champs magnétiques produits par des lignes d'énergie triphasées. Certains de ces mêmes paramètres sont également utilisés pour caractériser des champs électriques. En général, le champ magnétique en un point de l'espace peut être représenté comme un vecteur tournant qui trace une ellipse à chaque cycle des courants dans les conducteurs, comme illustré schématiquement à la figure C.1a [10]. La valeur efficace et la direction du demi-grand axe de l'ellipse du champ magnétique, représenté par M dans la figure C.1a, indiquent l'amplitude et la direction efficaces du **champ magnétique maximal**. De la même manière, l'amplitude et la direction efficaces du demi-petit axe, représenté par m dans la figure C.1a, décrivent l'amplitude et la direction du champ magnétique minimal. De tels champs sont dits champs à polarisation elliptique.

Dans la mesure où des champs magnétiques, présents dans des environnements éloignés des lignes d'énergie, peuvent être également produits par de nombreuses sources de courants qui ne sont pas nécessairement en phase, des champs magnétiques elliptiquement polarisés peuvent apparaître en de nombreux endroits (soit le domicile, le lieu de travail, etc.). Selon la géométrie et les courants présents dans les conducteurs, le degré de polarisation d'un champ magnétique en un point, peut varier et aller de linéaire ($m = 0$) à circulaire ($m = M$) comme l'illustrent les figures C.1b et C.1c. La présente discussion sur les champs polyphasés suppose l'absence totale d'harmoniques dans le champ. L'état de polarisation des champs ayant un taux d'harmoniques significatif est plus complexe [61], [40].

Près du niveau du sol, l'amplitude du champ magnétique produit par une ligne d'énergie triphasée varie lentement en fonction de la hauteur du point de mesure au-dessus du sol. Par exemple, pour une ligne type de 500 kV, la variation de l'amplitude du champ magnétique, à une hauteur voisine de 1 m au-dessus du sol, est inférieure à 2 % pour une variation de 10 % dans la hauteur de mesure pour des emplacements situés juste au-dessous de la ligne. L'uniformité augmente en des points plus distants. Pour des emplacements éloignés de la ligne, l'amplitude du champ magnétique produit par une ligne triphasée constituée d'un seul faisceau (circuit unique), avec des courants équilibrés ou presque équilibrés, décroît pratiquement selon $1/r^2$, où r est la distance latérale par rapport à la ligne (r est supposé beaucoup plus grand que la distance séparant les conducteurs) [54]. Au fur et à mesure que le déséquilibre du courant augmente, la décroissance de l'amplitude du champ magnétique évolue d'une variation en $1/r^2$ vers une variation en $1/r$ [54], [68]. Le champ magnétique produit par des lignes triphasées à faisceau double, les deux circuits étant équilibrés, avec une mise en phase faiblement inductive (c'est-à-dire pour des courants de charge identiques ou presque identiques sur les deux circuits), décroît approximativement selon $1/r^3$ où r est là encore beaucoup plus grand que la distance séparant les conducteurs. Les variations temporelles du champ magnétique dépendent des variations des courants de charge, pendant les périodes où de grandes quantités d'énergie électrique sont utilisées, les courants de charge augmentent et produisent des champs magnétiques plus grands (l'affaissement simultané des conducteurs peut aussi contribuer à produire des niveaux de champ plus élevés).

Annex C (informative)

General characteristics of magnetic and electric fields

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

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

Several of the above field parameters can be introduced by considering the case of magnetic fields produced by three-phase power lines. Some of the same parameters are also used to characterize electric fields. In general, the magnetic field at a point in space can be represented as a rotating vector that traces an ellipse for every cycle of the currents in the conductors as shown schematically in figure C.1a [10]. The r.m.s. magnitude and direction of the semi-major axis of the magnetic field ellipse, given by M in figure C.1a, indicate the magnitude and direction of the **maximum magnetic field**. Similarly, the r.m.s. magnitude and direction of the semi-minor axis, given by m in figure C.1a, describe the magnitude and direction of the minimum magnetic field. Such fields are said to be elliptically polarized.

Because magnetic fields in environments situated away from power lines can also be produced by multiple current sources that are not necessarily in phase, elliptically polarized magnetic fields can occur in many settings (e.g. the home, the work place, etc.). Depending on the geometry and currents in the conductors, the degree of magnetic field polarization at a given point can vary from linear ($m = 0$) to circular ($m = M$) as shown in figures C.1b and C.1c. This discussion of polyphase fields assumes that there are no harmonics in the field. The polarization state of fields with a significant harmonic content is more complicated [61], [40].

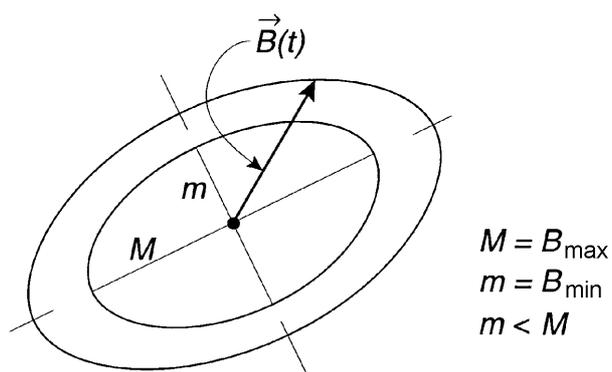
Near ground level the magnitude of the magnetic field from a three-phase transmission line changes slowly as a function of the height of the measurement point above ground. For example, for a typical 500 kV line, the change in the magnetic field magnitude at a height of approximately 1 m above ground level is less than 2 % for a 10 % change in the measurement height for locations underneath the line. The uniformity increases at more distant points. For locations far from the line, the magnitude of the magnetic field from a single-circuit three-phase line, with balanced or nearly balanced currents, decreases approximately as $1/r^2$, where r is the lateral distance from the line (r is assumed to be much greater than the conductor spacing) [54]. As the current imbalance increases, the decrease in magnetic field magnitude changes from a $1/r^2$ to a $1/r$ dependence [54], [68]. The magnetic field from balanced double-circuit three-phase lines with low reactance phasing (i.e. for identical or nearly identical load currents for both circuits) decreases approximately as $1/r^3$ where r is again much larger than conductor spacing. The temporal variations of the magnetic field is a function of load current variations, e.g. during heavy usage of electrical energy, the load currents increase and produce greater magnetic fields (the concurrent sagging of the conductors can also contribute to greater field levels).

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

Parmi les autres sources de champ magnétique couramment rencontrées figurent les conducteurs droits (par exemple les liaisons avec des systèmes/électrodes de mise à la terre) et les tours de fil approximativement circulaires (par exemple ceux rencontrés dans des transformateurs, des moteurs, des écrans de visualisation) avec des courants monophasés. Les figures C.2a et C.2b illustrent schématiquement les lignes du champ magnétique et les vecteurs en des points représentatifs par rapport à de telles sources. Les champs magnétiques sont habituellement polarisés linéairement et la dépendance vis-à-vis du temps des vecteurs oscillants dépend de la forme d'onde des courants. Des courants sinusoïdaux produisent des champs magnétiques sinusoïdaux exempts d'harmoniques et des courants non sinusoïdaux (par exemple les formes d'ondes en dents de scie générées par les bobines de déflexion des appareils de télévision) produisent des champs magnétiques non sinusoïdaux qui peuvent présenter des taux d'harmoniques élevés [25]. Les amplitudes des champs magnétiques produits par des courants circulant dans un fil droit de longueur infinie et dans une boucle de fil circulaire, diminuent selon $1/r$ [20] et $1/r^3$ [63] respectivement, où r est la distance par rapport à la source de champs (dans le dernier cas, on suppose que r est bien plus grand que le rayon de la boucle de fil circulaire).

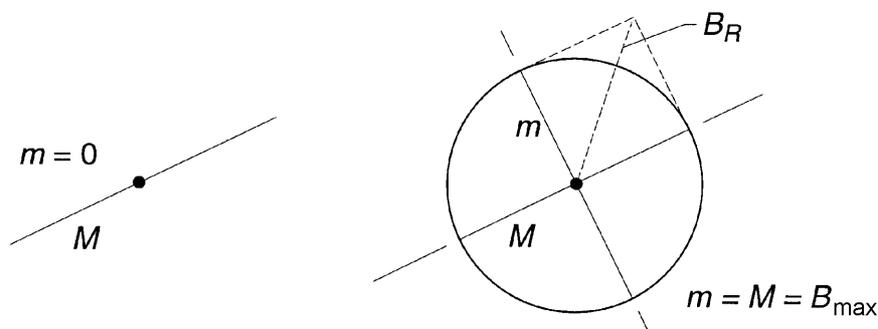
NOTE – While the magnetic field at and near ground level beneath a polyphase power line can be represented as a rotating vector or field ellipse, the electric field becomes linearly polarized at ground level.

Other commonly encountered sources of magnetic fields are straight conductors (e.g. connections to grounding systems/electrodes) and approximately circular turns of wire (e.g. found in transformers, motors, video display terminals) with single-phase currents. The magnetic field lines and vectors at representative points from such sources are shown schematically in figures C.2a and C.2b. The magnetic fields are usually linearly polarized and the time-dependence of the oscillating vectors depends on the waveform of the currents. Sinusoidal currents produce sinusoidal magnetic fields free of harmonics, and non-sinusoidal currents (e.g. the sawtooth waveforms from television deflection coils) produce non-sinusoidal magnetic fields that can be rich in harmonics [25]. The magnitudes of magnetic fields produced by currents in an infinitely long straight wire and a circular loop of wire decrease as $1/r$ [20] and $1/r^3$ [63], respectively, where r is the distance from the field source (in the latter case it is assumed that r is much greater than the radius of the circular loop of wire).



IEC 1 221/98

Figure C.1a – Caractéristiques de la polarisation elliptique, $m < M$



IEC 1 222/98

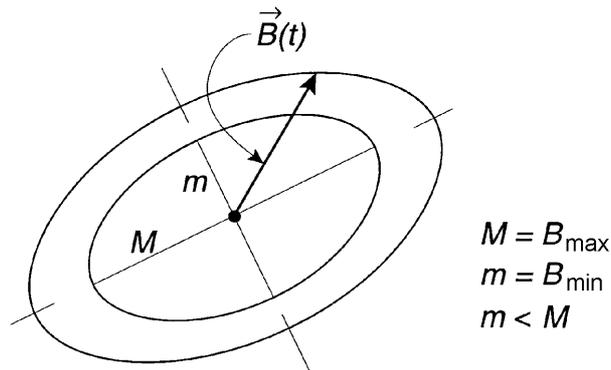
IEC 1 223/98

Figure C.1b – Caractéristiques de la polarisation linéaire, $m = 0$

Figure C.1c – Caractéristiques de la polarisation circulaire, $m = M$

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

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



IEC 1 221/98

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

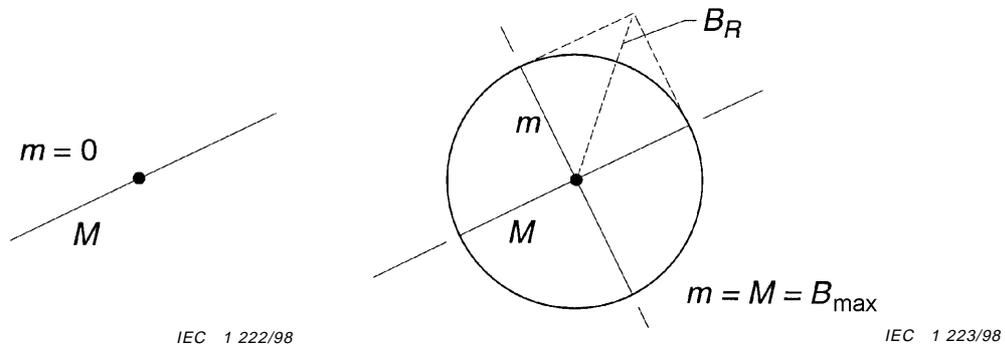
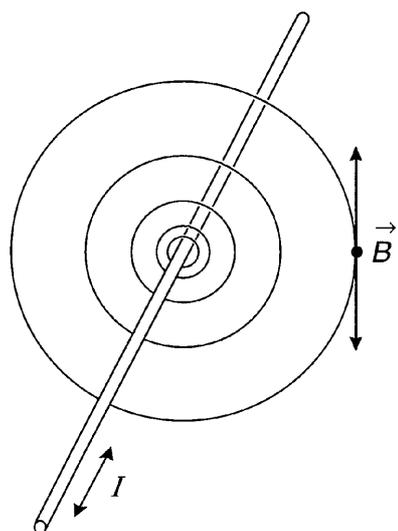


Figure C.1b – Quantities for linear polarization, $m = 0$

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

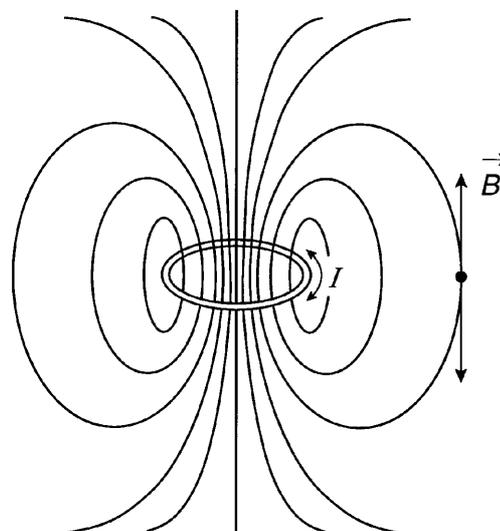
The resultant B_R and the **maximum magnetic field** M are equal only for the case of linear polarization. The largest difference between the resultant and **maximum magnetic field** occurs for circular polarization, i.e. B_R exceeds M by 41 %.

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



IEC 1 224/98

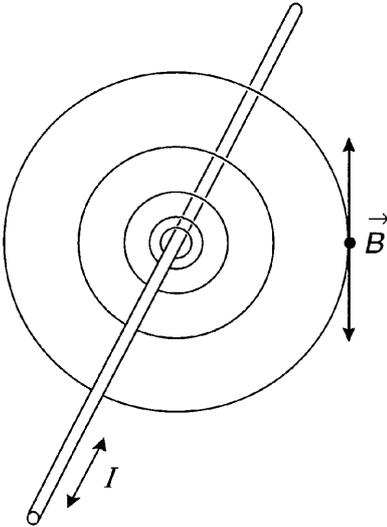
Figure C.2a – Courant circulant dans un conducteur rectiligne



IEC 1 225/98

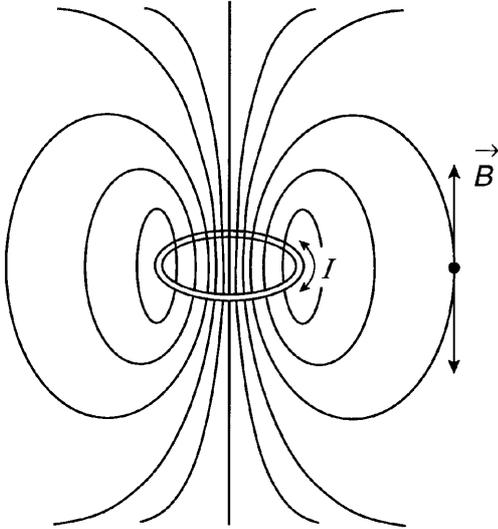
Figure C.2b – Courant circulant dans un conducteur circulaire

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



IEC 1 224/98

Figure C.2a – Current in straight conductor



IEC 1 225/98

Figure C.2b – Current in circular conductor

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

Annexe D (informative)

Capteurs d'induction magnétique (capteurs de champ magnétique) – Recommandations pour les mesures

D.1 Caractéristiques générales des capteurs de champ magnétique

Les capteurs de champ magnétique se composent de deux parties, la sonde ou partie détectrice de champ, et le détecteur, qui traite le signal provenant de la sonde et indique la valeur efficace du champ magnétique au moyen d'un dispositif d'affichage analogique ou numérique. Les sondes de champ magnétique, constituées d'une bobine de fil blindée électriquement (par exemple une sonde «mono-axiale»), ont été utilisées en combinaison avec un voltmètre qui joue le rôle du détecteur pour des mesures des champs magnétiques à fréquence industrielle produits par des lignes d'alimentation [27]. La figure D.1 représente schématiquement ce type d'instrument qui est un **dosimètre**. Bien qu'ils ne soient pas représentés à la figure D.1, les composants du circuit détecteur sont parfois incorporés à la sonde. Les capteurs de champ magnétique mesurent la composante du vecteur de champ magnétique oscillant (polarisation linéaire) ou tournant (polarisation elliptique ou circulaire), qui est perpendiculaire à la surface de la ou des sondes. La direction perpendiculaire à la surface de la sonde coïncide avec l'axe sensible de la sonde.

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

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

Pour des mesures de longue durée et/ou des mesures plus exhaustives, le capteur de contrôle de champ peut être remplacé par un instrument qui enregistre les mesures de champ dans un système de mémorisation des données [25], [61]. Les enregistrements du champ peuvent être effectués automatiquement à des intervalles de temps prédéfinis, déclenchés par l'utilisateur, ou déclenchés par une autre source, telle qu'un équipement détecteur de position.

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

Annex D (informative)

Magnetic flux density meters (magnetic field meters) – Guidance for measurements

D.1 General characteristics of magnetic field meters

Magnetic field meters consist of two parts, the probe or field-sensing element, and the detector, which processes the signal from the probe and indicates the r.m.s. value of the magnetic field with an analogue or digital display. Magnetic field probes, consisting of an electrically shielded coil of wire (i.e. a "single-axis" probe), have been used in combination with a voltmeter as the detector for survey type measurements of power frequency magnetic fields from power lines [27]. A diagram of this kind of instrumentation, which is one example of a **survey meter**, is shown in figure D.1. While not indicated in figure D.1, components of the detector circuit are sometimes incorporated with the probe. Magnetic field meters measure the component of the oscillating (linearly polarized) or rotating (elliptically or circularly polarized) magnetic field vector that is perpendicular to the area of the probe(s). The direction normal to the area of the probe coincides with the sensitive axis of the probe.

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

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

For long-term and/or more comprehensive measurement applications, the survey-type field meter can be replaced with instrumentation which records the readings of the field in a data storage system [25], [61]. The recordings of the field can be made automatically at predetermined time intervals, triggered by the user, or triggered by some other source, such as position-detecting equipment.

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

Les **dosimètres** et les instruments d'enregistrement peuvent être mono-axiaux ou tri-axiaux (bien que les instruments d'enregistrement soient plus généralement tri-axiaux). Les instruments tri-axiaux sont munis de trois **bobines** ou parties sensibles (par exemple des **bobines** exploratrices de **magnétomètres à noyau saturable**) qui détectent le champ suivant trois directions orthogonales entre elles. Les signaux provenant de chacune des parties sensibles des capteurs tri-axiaux peuvent être traités par le détecteur de deux façons. Selon un principe, le détecteur détermine la valeur efficace de chaque composante spatiale, détermine le carré de chacune de ces valeurs efficaces et en calcule la somme, dont il extrait ensuite la racine carrée. Selon l'autre principe, le détecteur calcule le carré du signal provenant de chaque capteur, extrait la racine carrée de la somme, puis détermine la valeur efficace de la racine carrée. Les deux méthodes aboutissent au même résultat, qui est le **champ magnétique résultant** B_R , tel que défini par l'équation (4). En général, le **champ magnétique résultant** n'est pas égal au **champ magnétique maximal**, variant de 100 % (pour des champs à polarisation linéaire) à 141 % (pour des champs à polarisation circulaire) par rapport au **champ magnétique maximal**.

Il convient de noter que B_R est aussi égal à l'induction magnétique totale efficace [33] et ce, indépendamment des phases des composantes orthogonales. L'indépendance des phases fait que B_R n'est pas unique, dans ce sens que le même **champ magnétique résultant** peut être produit par des champs magnétiques ayant des géométries différentes, par exemple un champ magnétique à polarisation linéaire avec des composantes orthogonales $B_0 \sin \omega t$ et $B_0 \cos \omega t$, et un champ magnétique à polarisation circulaire avec des composantes orthogonales $B_0 \sin \omega t$ et $B_0 \cos \omega t$ auront le même champ résultant B_0 .

Il est possible d'utiliser des capteurs mono-axiaux pour mesurer la **valeur maximale du champ magnétique** en faisant varier l'orientation de la sonde jusqu'à obtenir une lecture maximale. Les capteurs mono-axiaux peuvent également servir à déterminer le **champ magnétique résultant** en mesurant les valeurs efficaces de trois composantes spatiales orthogonales et en les combinant entre elles selon l'équation (4). On suppose que, durant cette procédure, il n'y a aucune variation significative des valeurs efficaces des composantes spatiales.

Le développement, au cours de ces dernières années, de petits posemètres individuels pour mesurer les champs magnétiques, qui sont des dispositifs portatifs destinés à mesurer et à enregistrer périodiquement les trois composantes spatiales (efficaces) du champ magnétique, a également conduit à l'utilisation de **bobines** miniatures, contenant parfois des noyaux ferromagnétiques destinés à augmenter la sensibilité [25]. Bien que les sondes orientées orthogonalement dans les posemètres soient très voisines les unes des autres, il est possible qu'elles n'aient pas un point central commun, c'est-à-dire que les sondes sont placées en des endroits différents. Les posemètres sont équipés d'une interface avec un ordinateur, qui permet le transfert des valeurs de champ enregistrées à un ordinateur à des fins d'analyse ultérieure. D'autres types de capteurs de champ, munis de **bobines** d'inductance de perméabilité élevée, tels que le **magnétomètre à noyau saturable** [55], ont été adaptés pour des mesures de champs alternatifs et/ou statiques.

Il existe des instruments encore plus sophistiqués qui enregistrent périodiquement et simultanément la forme d'onde des trois composantes orthogonales du champ magnétique et qui contiennent donc des informations sur l'amplitude, la phase, et la fréquence qui sont ultérieurement analysées pour évaluer le degré de polarisation, les harmoniques, etc. [61].

Il existe également des capteurs de champ magnétique, munis de **sondes à effet Hall**, qui peuvent servir à mesurer des inductions magnétiques à des fréquences allant de zéro hertz jusqu'à plusieurs centaines de hertz. Cependant, en raison de leur faible sensibilité et des problèmes de saturation liés au champ terrestre, ils ne conviennent pas pour des environnements où les champs alternatifs sont de faible niveau, par exemple au voisinage des lignes d'alimentation et dans les bâtiments résidentiels.

Both **survey meters** and logging instruments can be single-axis or three-axis (although logging instruments are more likely to be three-axis). Three-axis instruments can have three **coil probes** or sensing elements (e.g. circular coil probes with orthogonal axes) which detect the field along three mutually orthogonal directions. The signal from each sensing element of three-axis meters can be processed by the detector in one of two ways. In one approach, the detector determines the r.m.s. value of each spatial component, squares and sums them, and then takes the square root of the sum. In the other approach, the detector squares the signal from each sensor, takes the square root of the sum, and then determines the r.m.s. value of the square root. Both methods yield the same result, which is the **resultant magnetic field** B_R , as defined by equation (4). In general, the **resultant magnetic field** is not equal to the **maximum magnetic field**, varying from 100 % (for linearly polarized fields) to 141 % (for circularly polarized fields) of the **maximum magnetic field**.

It should be noted that B_R is also equal to the r.m.s. total magnetic flux density [33], regardless of the phases of the orthogonal components. One consequence of the phase independence is that B_R is not unique, in the sense that the same **resultant magnetic field** can be produced by magnetic fields with different geometries, e.g. a linearly polarized magnetic field with orthogonal components $B_0 \sin \omega t$ and $B_0 \cos \omega t$, and a circularly polarized magnetic field with orthogonal components $B_0 \sin \omega t$ and $B_0 \cos \omega t$ will have the same resultant B_0 .

Single-axis meters can be used to measure the **maximum value of the magnetic field** by orienting the probe until a maximum reading is obtained. Single-axis meters can also be used to determine the **resultant magnetic field** by measuring the r.m.s. values of three orthogonal spatial components and combining them according to equation (4). It is assumed that during this procedure there are no significant changes in the r.m.s. values of the spatial components.

The development in recent years of small personal exposure meters for the measurement of magnetic fields, devices that can be worn to measure periodically and record the three (r.m.s.) spatial components of the magnetic field, has also led to the use of miniature **coil probes**, sometimes containing ferromagnetic cores for increased sensitivity [25]. The orthogonally oriented probes in exposure meters, while in close proximity to one another, may not share a common central point, i.e. the probes are at different locations. Exposure meters are equipped with a computer interface which permits the downloading of the recorded field values to a computer for later analysis. Other types of field meters with high permeability inductor probes, such as the **fluxgate magnetometer** [55], have been adapted for alternating and/or static field measurements.

Yet more sophisticated instrumentation is available that periodically records the magnetic field waveform of the three orthogonal field components at the same instant, and thus contains magnitude, phase, and frequency information that is subsequently analysed for degree of polarization, harmonics, etc. [61].

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

D.2 Théorie de fonctionnement (bobines)

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

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dA \right] \quad (14)$$

où

\mathbf{B} est l'induction magnétique;

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

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

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

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

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t \quad (15)$$

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

Pour une boucle de N spires, la tension donnée par l'équation (15) se développe dans chaque spire et la tension totale est $-N\omega B_0 A \cos \omega t$. L'équation (15) montre que la sensibilité augmente en même temps que la surface de la sonde.

Si le champ magnétique contient des harmoniques, il y aura un terme supplémentaire dans le membre droit de l'équation (15) pour chaque harmonique. A cause de l'opération de différentiation (voir équation (14)), chacun des termes supplémentaires est pondéré par le rang de l'harmonique associée. Par exemple, s'il y avait 10 % d'harmonique 3 dans le champ, le terme $-3(0,1)\omega B_0 A \cos 3\omega t$ devrait être ajouté au membre droit de l'équation (15). En raison de la pondération du terme de l'harmonique, la forme d'onde du signal ne reflète plus la forme d'onde du champ. En conséquence, la valeur efficace indiquée par le voltmètre-détecteur (voir figure D.1) ne fournit pas la représentation fidèle de la valeur efficace du champ. La forme d'onde donne en fait, avec une bonne approximation, la variation temporelle de la tension ou du courant induit(e) dans des matériaux conducteurs.

Pour restituer la forme d'onde du champ magnétique, il est nécessaire que le détecteur effectue l'opération mathématique inverse, à savoir l'intégration. Pour cela, il convient d'incorporer un étage d'intégration dans le détecteur¹⁾. Par exemple, il est possible de combiner l'étage d'intégration avec la sonde sous forme de composants passifs, ou alors il est possible d'intégrer un amplificateur opérationnel dans le détecteur. Il est souhaitable que la **réponse en fréquence** de l'ensemble sonde détecteur intégrateur soit plate sur toute la plage de fréquences étudiée. Il est souhaitable que le circuit détecteur comprenne, dans sa conception, des filtres et un blindage au champ électrique adéquat afin de supprimer les signaux non désirés.

¹⁾ Si le signal est numérisé, l'intégration peut être effectuée par calcul informatique.

D.2 Theory of operation (coil probes)

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

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dA \right] \quad (14)$$

where

\mathbf{B} is the magnetic flux density;

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

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

V will be in units of volts when A and B are in square meters and tesla, respectively.

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

$$V = -\omega B_0 A \cos \omega t \quad (15)$$

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

For N turns of wire in the loop, the voltage given by equation (15) will develop across each turn and the total voltage will be $-N\omega B_0 A \cos \omega t$. Equation (15) shows that the sensitivity increases with the area of the probe.

If there are harmonics in the magnetic field, there will be an additional term on the right side of equation (15) for each harmonic. Because of the differentiation operation (see equation (14)), each of the additional terms will be weighted by the associated harmonic number. For example, if there were 10 % third harmonic in the field, the term $-3(0,1)\omega B_0 A \cos 3\omega t$ would be added to the right side of equation (15). Because of the weighting of the harmonic term, the waveform of the signal will no longer reflect the waveform of the field. Consequently, the r.m.s. value indicated by the voltmeter-detector (see figure D.1) will not accurately represent the r.m.s. value of the field. The waveform does, however, give a good approximation of the time-variation of the voltage or current induced in conducting materials.

To recover the magnetic field waveform it is necessary for the detector to perform the inverse mathematical operation, namely integration. This can be accomplished by introducing a stage of integration in the detector¹⁾. For example, the integration stage can be combined with the probe in the form of passive components, or an integrating operational amplifier can be incorporated into the detector. The **frequency response** of the probe-integrating detector combination should be made flat over the frequency range of interest. Filters and adequate electric field shielding should be part of the detector circuit design to exclude unwanted signals.

¹⁾ If the signal is digitized, the integration can be done by computation

En plus de l'analyse de la réponse du détecteur aux champs à différentes fréquences, il est également nécessaire d'analyser la **réponse en fréquence** de la sonde. Compte tenu de l'inductance propre, de la résistance propre et de la capacité propre de la sonde, il convient d'analyser, en fonction de la fréquence, la relation entre la tension induite dans la bobine V (voir équation (15)), et la tension à l'entrée du détecteur v_p . La figure D.2 illustre, de façon schématique et simplifiée, le circuit équivalent pour la bobine. Le rapport $|W|$ entre la tension de la sonde v_p et la tension induite V est donné par [2]

$$|W| = \frac{v_p}{V} = \left[\frac{R+r}{R} - \omega^2 LC \right]^2 + \left[\omega \left(\frac{L}{R} + Cr \right) \right]^2 \right]^{-1/2} \quad (16)$$

où

L et r sont l'inductance et la résistance de la bobine et de ses conducteurs;

C est la capacité parasite;

R est l'impédance d'entrée approximée du détecteur.

Il est souhaitable que la valeur de $|W|$ reste voisine de l'unité et n'atteigne pas des pics avant de chuter lorsque la fréquence augmente. Des valeurs élevées de R sont susceptibles d'entraîner une montée au voisinage de la fréquence de résonance de la sonde, suivie d'une chute rapide de la valeur de $|W|$. Des valeurs plus faibles de R permettent à la valeur de $|W|$ de s'atténuer lentement lorsque la fréquence augmente. Toutefois, une valeur trop faible entraîne une atténuation plus rapide et une réduction inutile de la **réponse en fréquence** [18].

La théorie de fonctionnement des capteurs de champ magnétique munis de sondes contenant des noyaux ferromagnétiques est plus complexe que le fonctionnement de capteurs à inducteurs à air, parce que la perméabilité du matériau constituant l'inducteur peut varier en fonction de la fréquence et de l'amplitude du champ. Le fonctionnement de capteurs de champ magnétique munis de sondes à noyaux ferromagnétiques est abordé dans [25] et [55].

D.3 Objectifs et méthodes de mesure

Comme mentionné à l'annexe C, il est possible de caractériser des champs magnétiques (et électriques) par un certain nombre de paramètres, c'est-à-dire l'amplitude, la fréquence, la polarisation, etc. La caractérisation d'un ou de plusieurs de ces paramètres et leurs effets possibles sur les êtres humains peuvent constituer les objectifs d'un programme de mesure. Pour guider les lecteurs désirant développer un protocole de mesure de champs, le présent article fournit une liste d'objectifs et de méthodes de mesure permettant d'atteindre ces objectifs.

Il est extrêmement important que les objectifs d'un programme de mesure tels que ceux traités ci-après soient clairement définis. Une définition claire des objectifs est nécessaire pour la détermination des exigences applicables aux instruments et à leur étalonnage, par exemple **bande passante** des instruments, plage d'amplitudes, points d'étalonnage en fréquence, etc. Une fois que les objectifs ont été identifiés et que l'on s'est procuré les instruments adéquats, il peut être appréciable de procéder à une étude pilote dans l'environnement de mesure concerné avant de prendre des décisions sur les méthodes de mesure et sur le protocole associé qui seront finalement adoptés. Le protocole décrira chaque étape de la procédure à suivre, en utilisant les méthodes possibles indiquées, pour atteindre les objectifs des mesures. Le protocole peut explicitement indiquer des éléments tels que les exigences applicables aux instruments, (par exemple **bande passante**, dimensions de la sonde, plage d'amplitudes), les emplacements où doivent être effectuées les mesures et la durée des mesures. Le protocole doit pouvoir permettre de comparer en confiance les résultats avec des résultats de mesure obtenus dans des environnements électriques similaires.

In addition to considering how the detector responds to fields with different frequencies, it is also necessary to consider the **frequency response** of the probe. Because of the inherent inductance, resistance and capacitance of the probe, the relationship between the voltage induced in the coil V [see equation (15)] and the voltage entering the detector v_p should be considered as a function of frequency. A simplified schematic view of the equivalent circuit for the **coil probe** is shown in figure D.2. The ratio $|W|$ of probe voltage v_p to induced voltage V is given by [2]

$$|W| = \left| \frac{v_p}{V} \right| = \left[\left[\frac{R+r}{R} - \omega^2 LC \right]^2 + \left[\omega \left(\frac{L}{R} + Cr \right) \right]^2 \right]^{-1/2} \quad (16)$$

where

L and r are the inductance and resistance of the coil and its leads;

C is the stray capacitance;

R is the approximate input impedance of the detector.

The value of $|W|$ should remain close to unity and not peak before falling off with increasing frequency. High values of R can cause peaking near the resonance frequency of the probe, followed by a rapid fall-off in $|W|$. Lower values of R permit the value of $|W|$ to roll off gently with increasing frequency. Too low a value, however, causes a more rapid roll-off and an unnecessary reduction in the **frequency response** [18].

The theory of operation for magnetic field meters with probes containing ferromagnetic cores is more complicated than the air core case because the permeability of the core material may vary with the frequency and magnitude of the field. Discussions regarding operation of magnetic field meters with probes containing ferromagnetic cores are given in [25] and [55].

D.3 Measurement goals and methods

As noted in annex C, magnetic (and electric) fields can be characterized according to a number of parameters, i.e. magnitude, frequency, polarization, etc. Characterization 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 clause provides a list of such possible measurement goals and possible methods for their accomplishment.

It is extremely important that the goals of a measurement programme such as those considered below, be clearly defined at the outset. 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 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.

La présente norme n'est pas trop explicite dans ses recommandations à propos des méthodes et des protocoles de mesure, vu que ces derniers dépendent des objectifs et que l'on rencontrera des différences notables dans les divers environnements de mesure. Lors de l'élaboration d'une méthode et d'un protocole de mesure, il convient de tenir compte, selon le cas, des sources de champs magnétiques et des points énumérés comme suit:

- sources électriques alimentant l'installation;
- types et emplacements des transformateurs;
- emplacements des principaux câbles et disjoncteurs;
- amplitude des tensions d'alimentation, périodes d'utilisation maximale;
- fréquences (y compris 0 Hz) des alimentations et des dispositifs électriques;
- position des personnes par rapport à des sources de champs connues;
- emplacement de mesure par rapport au corps humain, par exemple tête, tronc, région du bassin;
- présence de moteurs et de générateurs;
- présence de petits appareils de chauffage;
- systèmes et liaisons de mise à la terre.

Il convient de prendre des décisions à propos de l'incertitude admissible totale pendant les mesures (des prescriptions relatives à l'incertitude des instruments sont données en 5.1). Des croquis sont souvent nécessaires pour décrire comme il se doit les zones où les mesures vont effectuées. Les schémas électriques des bâtiments peuvent être utiles pour l'identification des sources de champs dans des bâtiments à usage administratif et autres bâtiments similaires, bien qu'il soit déconseillé de trop faire confiance à de tels documents, parce qu'il est possible que des modifications dans le réseau électrique des bâtiments n'aient pas été consignées dans ces documents. Bien que de nombreuses sources de champs magnétiques soient visibles, par exemple éclairage vertical par plafonnier, appareils électriques, d'autres ne le sont pas, par exemple équipements électriques dans des locaux voisins ou installés dans des étages supérieurs ou inférieurs). Au cours d'une étude pilote, des décisions peuvent être prises à propos des intervalles entre les mesures, des hauteurs de mesure, de la taille des échantillons, des formats des fiches techniques, des questionnaires relatifs à la classification des fonctions/tâches, etc. Si l'objectif des mesures est de déterminer l'exposition des êtres humains, il est vivement recommandé d'examiner des procédures de mesure, telles que décrites dans les études épidémiologiques mentionnées ci-après, dans le cadre du processus d'élaboration d'un protocole de mesure final.

Bien que l'objectif majeur de la présente norme soit de fournir un guide pour déterminer ou estimer l'exposition des êtres humains à un ou plusieurs des paramètres qui caractérisent les champs magnétiques, il existe d'autres objectifs de mesures liés à des applications particulières. Par exemple, on peut se proposer de déterminer la distribution spatiale du champ magnétique «avant» et «après» la mise en oeuvre de technique d'atténuation des champs produits par des lignes d'énergie, pour en vérifier l'efficacité. On peut aussi se proposer de faire des mesures de distributions spatiales de champs produits par des appareils électriques, afin de vérifier la conformité aux normes applicables aux produits utilisés par les consommateurs [51], [28].

La liste ci-après énumère des objectifs de mesure possibles ainsi que des méthodes de mesure permettant de les atteindre. Il convient de ne pas considérer cette liste comme exhaustive, car il existe une grande variété d'objectifs et de méthodes. Pour chaque objectif, la **bande passante** de la fréquence des instruments est choisie pour la ou les fréquences étudiées (voir objectif (g)). Bien qu'elle ne fasse pas partie des paramètres de champs couverts par la présente norme, la caractérisation des champs magnétiques statiques peut s'avérer intéressante.

This standard is not too explicit in its recommendations regarding measurement methods and protocols because of their dependence on the goals and because of the significant differences that will be encountered in the various measurement environments. When developing a measurement method and protocol, the following sources of magnetic fields and items should 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, pelvic region;
- presence of any motors and generators;
- presence of small heaters;
- earthing systems and connections.

Decisions should be made regarding the total uncertainty permissible during measurements (instrumental uncertainty requirements are given in 5.1). Sketches are often necessary to adequately describe the areas where measurements will be made. Electrical diagrams of buildings can be helpful in identifying the sources of fields in offices and similar buildings, although excessive reliance on such documentation should be avoided because of unrecorded changes in the building's electrical system. 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). During a pilot study, decisions can be made regarding spacing between measurements, measurement heights, sample size, formats of data sheets, questionnaires for job/task classification, etc. If determining human exposure is the goal of the measurements, examination of measurement procedures, as described in the epidemiological studies cited below, is strongly recommended as part of the process for developing a final measurement protocol.

While providing guidance for determining human exposure or estimates of human exposure to one or more magnetic field parameters is a primary goal of this standard, other measurement goals with related applications exist. For example, "before" and "after" spatial distribution measurements of magnetic fields, performed in order to check the effectiveness of power line field mitigation techniques, and spatial distribution of fields from electrical appliances carried out to check for compliance with consumer product standards [51], [28] are possible applications.

A list of possible measurement goals and possible methods for their accomplishment is given below. The list should not be considered exhaustive since there can be a wide variety of goals and methods. For each goal the frequency **pass-band** of the instrumentation is chosen for the frequency or frequencies of interest (see goal (g)). While it is outside the scope of field parameters considered in this standard, characterization of static magnetic fields may also be of interest.

Objectif (a): caractérisation des niveaux de champs magnétiques

Les limites admissibles de champs magnétiques, en fonction de la fréquence, ont été indiquées dans bon nombre de documents [5], [29] ce qui nécessite la détermination de la valeur maximale du champ dans des zones spécifiées. Il est possible que les emplacements où sont effectuées les mesures coïncident avec les points dans l'espace occupés par la tête, le tronc ou le bassin d'une personne.

Méthode: Il est possible d'utiliser des capteurs mono-axiaux et des capteurs tri-axiaux pour effectuer des **mesures ponctuelles du champ magnétique maximal** et du **champ magnétique résultant**. Il existe des recommandations pour effectuer de telles mesures à proximité de lignes d'alimentation [27] et des écrans de visualisation [28],[51]. Il est possible d'établir des corrélations entre des **mesures ponctuelles** effectuées à proximité de lignes d'alimentation et des courants de charge, et d'estimer les valeurs des champs magnétiques pour différents courants de charge. Les courants de charge relatifs aux appareils électriques sont soit constants, soit typiquement cycliques sur une plage fixe en un temps relativement bref; ils permettent ainsi de déterminer le plus grand champ magnétique «maximal» ou «résultant» avec un nombre relativement peu élevé de **mesures ponctuelles**.

Dans des environnements éloignés des lignes d'alimentation et des appareils électriques, dans lesquels il n'est pas facile de faire des corrélations avec les courants des sources de champs magnétiques, les **mesures ponctuelles** représentent une caractérisation grossière des niveaux de champs [25], [26]. Si des mesures plus affinées du champ magnétique sont exigées, il est possible d'utiliser des capteurs de champ magnétique munis d'un dispositif d'enregistrement, dans les emplacements étudiés et pendant toutes les durées nécessaires pour produire la plage complète de valeurs de champ. Par exemple, dans des bâtiments résidentiels, cela pourrait impliquer plusieurs enregistrements de 24 h, répétés à chaque saison de l'année (voir objectif (c)).

Objectif (b): caractérisation des variations spatiales

La distribution spatiale des champs magnétiques, loin des lignes d'alimentation ou des sources élémentaires identifiables, est habituellement inconnue. Par exemple, la figure D.3 montre la dispersion des mesures effectuées au centre d'une pièce (champ magnétique vertical, partie supérieure du thorax) par rapport à d'autres emplacements dans des salles de séjour et des cuisines lors d'un contrôle effectué sur 77 résidences [62]. Bien que les niveaux des champs en différents endroits n'aient pas été déterminés au même instant, les données indiquent des variations possibles au niveau de la même pièce dans des bâtiments résidentiels. Dans la plupart des environnements, les champs magnétiques alternatifs sont non uniformes en raison de la dépendance spatiale des champs vis-à-vis des courants des sources (voir annexe C). Il convient de noter que des champs magnétiques statiques présentent aussi une variabilité spatiale considérable dans des bâtiments résidentiels [64].

Méthode: Les mesures relatives aux variations spatiales nécessitent l'enregistrement des composantes du champ magnétique en fonction de la position. Il existe des normes pour de telles mesures à proximité de lignes d'alimentation [27] et des écrans de visualisation [28], [51]. Bien qu'il soit possible d'effectuer de telles mesures à l'aide de **dosimètres**, il existe des instruments incorporant des «roues de mesure» permettant de caractériser les distributions spatiales des champs magnétiques dans des environnements où la présence d'obstacles physiques ne gêne pas le mouvement de la roue. Au fur et à mesure que la roue tourne, elle active périodiquement un capteur de champ magnétique tri-axial pour enregistrer le **champ magnétique résultant**. Des logiciels, fournis avec de tels instruments, permettent de produire des tracés des profils de champs magnétiques, des contours d'équi-champs, des analyses statistiques des niveaux de champs, etc. Comme pour l'objectif (a), de telles données ne permettront pas de déterminer les variations temporelles des profils de champs sans répéter les mesures.

Goal (a): characterization of magnetic field levels

Limits on permissible magnetic field levels as a function of frequency have been indicated in a number of documents [5], [29] necessitating the determination of field levels with the greatest magnitude in specified areas. The measurement locations may coincide with points in the space occupied by a person's head, trunk or pelvic area.

Method: single-axis and three-axis meters can be used to make **spot measurements** of the maximum and **resultant magnetic fields**, respectively. Guidance exists for such measurements near power lines [27] and video display terminals (VDTs) [28]; [51]. **Spot measurements** near power lines can be correlated with load currents, and estimates of magnetic fields for different load currents can be made. Load currents for appliances are either constant or, typically, cycle through a fixed range in a relatively short time, enabling the determination of the largest "maximum" or "resultant" magnetic field with relatively few **spot measurements**.

In environments away from power lines and appliances where correlations with magnetic field source currents are not readily made, **spot measurements** represent a coarse characterization of field levels [25]; [26]. If more definitive measurements of the magnetic field are required, magnetic field meters with recording capability can be used at locations of interest for times thought to be representative when producing the full range of field values. For example, in residences this might involve several 24 h records repeated during each season of the year (see goal (c)).

Goal (b): characterization of spatial variations

The spatial distribution of magnetic fields away from power lines or single identifiable sources is typically unknown. For example, figure D.3 shows scatter plots of centre-of-room measurements (vertical magnetic field, chest-high) versus measurements at other locations in living rooms and kitchens during a survey of 77 residences [62]. While the field levels at different locations were not determined at the same instant, the data are indicative of possible variations in the same room of residences. Alternating magnetic fields in most environments will be non-uniform because of the spatial dependence of the fields from the source currents (see annex C). It is noteworthy that static magnetic fields also show considerable spatial variability in residences [64].

Method: Spatial variation measurements require the recording of the magnetic field components as a function of coordinate position. Standards exist for carrying out such measurements near power lines [27] and VDTs [28], [51]. While such measurements can be made with **survey meters**, instrumentation incorporating "measurement wheels" is available for characterizing 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. As for goal (a), such data will not capture the temporal variations of the field profiles without repeated measurements.

Objectif (c): caractérisation des variations temporelles

Les champs magnétiques étant produits par des courants de charge et par des courants de retour à la terre qui peuvent varier considérablement dans le temps, leurs variations temporelles peuvent facilement dépasser 100 %. Par exemple, la figure D.4 illustre des enregistrements de 24 h du **champ magnétique résultant** parasite au centre d'une salle de séjour dans une zone urbaine pendant deux jours durant lesquels les courants de charge ont considérablement varié en raison des conditions atmosphériques [26]. Les données ont été enregistrées toutes les 15 s, à l'aide d'un **dosimètre** placé à une hauteur de 1 m au-dessus du sol et ayant une **bande passante** appropriée pour caractériser la fréquence industrielle et ses harmoniques. La figure D.4a montre des mesures effectuées au cours d'une journée chaude et humide alors que les climatiseurs étaient supposés fonctionner à plein régime. La figure D.4b montre des mesures de champs effectuées au même emplacement, au cours d'une journée plus fraîche et moins humide: l'analyse des résultats permet d'observer une distribution très différente des valeurs de champ, avec un champ moyen égal à environ la moitié du champ observé au cours de la journée chaude et humide. Les données sont anecdotiques, mais elles donnent une idée sur ce qui peut se produire lors de variations notables des courants de charge. Le déplacement d'objets ferromagnétiques, par exemple des automobiles et camions passant devant l'emplacement où sont effectuées les mesures, constitue un mécanisme susceptible de produire des variations temporelles à court terme du champ magnétique.

Méthode: Il existe des capteurs de champ magnétique tri-axiaux et mono-axiaux, munis de connexions de sortie pouvant être raccordées aux enregistreurs disponibles dans le commerce, ce qui permet d'enregistrer la variation des niveaux de champ magnétique en un ou plusieurs endroits, en fonction du temps. Il est également possible d'utiliser des posemètres tri-axiaux et des capteurs de formes d'ondes de champs magnétiques (voir article D.1) pour enregistrer périodiquement les niveaux de champs. Etant donné la dépendance des niveaux de champs magnétiques vis-à-vis des courants de charge, qui peuvent varier de façon quotidienne, hebdomadaire, saisonnière, etc., le problème est de déterminer l'intervalle de temps entre les mesures qui permettra de détecter suffisamment de variations du champ afin d'obtenir une description statistique valable. La réalisation d'une étude pilote initiale dans l'environnement concerné par les mesures peut s'avérer utile pour répondre à la question relative au temps d'échantillonnage de mesure.

Il convient de tenir compte d'autres considérations lorsque des mesures sont effectuées dans des systèmes électriques de transports en commun ou dans d'autres endroits où se trouvent des moteurs à vitesse réglable. Par exemple, dans les métros, le champ magnétique peut être tributaire de la vitesse de la rame [13].

Objectif (d): caractérisation du champ magnétique moyen pondéré dans le temps

De nombreuses études épidémiologiques sur les maladies cancéreuses en milieu professionnel et chez l'enfant, qui ont analysé les effets potentiels des champs magnétiques à fréquences industrielles sur la santé humaine, ont considéré que le champ magnétique moyen pondéré dans le temps était un indicateur possible de la «dose» ou «la valeur» de l'exposition de référence [15], [38], [59], [67]. Ces études, ainsi que d'autres, ont fait de la détermination du champ magnétique moyen pondéré dans le temps un objectif de mesures adéquat.

Méthode: Des petits posemètres tri-axiaux, portés sur le corps et servant à mesurer l'intégrale par rapport au temps du champ magnétique, peuvent servir à mesurer directement le champ magnétique moyen pondéré dans le temps [32]. D'autres posemètres tri-axiaux, qui enregistrent périodiquement le champ magnétique (voir article D.1), peuvent être utilisés pour déterminer le champ magnétique moyen pondéré dans le temps par le biais d'analyses des valeurs de champ enregistrées. Il est également possible d'utiliser des combinaisons d'instruments au transport moins aisé et munis d'une fonction d'enregistrement pour mesurer le champ magnétique moyen pondéré dans le temps dans des emplacements étudiés. Des estimations du champ magnétique annuel moyen pondéré dans le temps ont été calculées pour des bâtiments résidentiels à partir d'enregistrements de courants de charge de lignes de transmission et de la position des bâtiments résidentiels le long des couloirs des lignes d'énergie [15].

Goal (c): characterization 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 100 %. For example, figure D.4 shows 24 h histories of the background **resultant magnetic field** at the centre of a living room in a metropolitan area on two days during which load currents varied significantly because of weather conditions [26]. The data were recorded with a survey meter every 15 s at a height of 1 m above the floor, and the **pass-band** was adequate to characterize the fundamental and power frequency harmonics. Figure D.4a shows measurements carried out during a hot humid day when air-conditioners were presumably in heavy use. Field measurements at the same location during a cool less humid day, shown in figure D.4b, reveal a significantly different distribution of field values with an average field of about one half that observed on the hot humid day. The data is anecdotal but indicative of what can occur when there are significant changes in load currents. A mechanism that can produce short term temporal variations of the magnetic field is the movement of ferromagnetic objects, e.g. automobiles and trucks driving past the measurement location.

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 (see clause D.1) 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, 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.

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 subways, the magnetic field can be a function of the speed of the subway car [13].

Goal (d): characterization of a time-weighted-average (TWA) magnetic field

A number of epidemiological studies on occupational and childhood cancer, that have examined the possibility of health effects from exposure to power frequency magnetic fields, have considered the estimated TWA magnetic field as the candidate exposure "dose" or "metric" [15], [38], [59], [67]. These and other studies have made the determination of the TWA magnetic field a relevant measurement goal.

Method: Small three-axis exposure meters which are worn on the body and measure the time integral of the magnetic field can be used to measure the TWA magnetic field directly [32]. Other three-axis exposure meters which record the magnetic field periodically (see clause D.1) can be used to determine the TWA magnetic field via analyses of the recorded field values. Less portable instrumentation combinations with recording capability can also be used to measure the TWA at locations of interest. Estimates of the annual TWA magnetic field have been calculated for residences from records of transmission line load currents and locations of the residences along the transmission line corridor [15].

Objectif (e): caractérisation de l'intermittence des champs magnétiques

On dispose de documents et de rapports indiquant qu'une exposition intermittente aux champs magnétiques à fréquence industrielle peut s'avérer plus efficace qu'une exposition aux champs entretenus pour déclencher certaines réponses biologiques [7]. De tels rapports suggèrent qu'un indice bâti sur les «hauts» et les «bas» (voir figure D.4) des niveaux des champs magnétiques peut être considéré comme une caractéristique motivant le choix du champ à quantifier.

Méthode: Pour atteindre cet objectif, il convient d'utiliser des capteurs de champ capables de mesurer et d'enregistrer périodiquement le champ magnétique. Il reste cependant à déterminer la périodicité avec laquelle il convient d'enregistrer les valeurs du champ, ou à déterminer les intervalles de temps pendant lesquels il convient de moyenner les valeurs de champ. Par exemple, pour caractériser les fluctuations, des mesures enregistrées toutes les 15 s (voir figure D.4) montrent, en général, plus de fluctuations que des moyennes horaires [41]. Il est possible de s'adresser aux chercheurs travaillant sur les effets biologiques qui fourniront des conseils sur la manière de définir un indice de fluctuations. Etant donné la disponibilité des données enregistrées, il est possible de calculer et de proposer différents indices de fluctuations, par exemple le nombre d'augmentations et de diminutions du champ (dépassant une certaine valeur en pourcentage), en utilisant les valeurs moyennées du champ pendant 1 min, 2 min, etc.

Objectif (f): caractérisation de l'incidence et de la durée de niveaux de champ dépassant une valeur de seuil de référence

Les modèles qui prédisent des effets biologiques supposent souvent l'existence d'une certaine valeur seuil d'un agent au-dessous duquel, le cas échéant, il n'y a aucun effet. Il existe un modèle analogue pour les effets potentiels des champs magnétiques sur les êtres humains.

Méthode: Pour atteindre cet objectif, il est possible d'utiliser des capteurs de champ qui enregistrent périodiquement le champ magnétique. Pour choisir le niveau de champ à utiliser comme valeur de seuil, il est possible que l'on soit amené à demander conseil aux chercheurs travaillant sur les effets biologiques. De la même manière que pour l'objectif (e), la disponibilité de données enregistrées permet de déterminer le nombre de fois où les valeurs de champ mesurées sont supérieures à une ou plusieurs valeurs de seuil de référence. Par ailleurs, comme pour l'objectif (e), il est possible que les résultats dépendent de la fréquence d'enregistrement des niveaux de champ magnétique.

Objectif (g): caractérisation des composantes fréquentielles d'un champ magnétique

Etant donné que (1) les champs magnétiques produits par des équipements électriques contiennent souvent des harmoniques de la fréquence industrielle ou des fréquences non liées à la fréquence industrielle, et que (2) les limites du champ magnétique ont été fixées en fonction de la fréquence [5], [29], la caractérisation des composantes fréquentielles peut constituer un objectif important. La figure D.5 donne un exemple de champ magnétique qui a un taux d'harmoniques élevé et qui est produit par un appareil électrique d'usage courant. La figure D.5a montre une **mesure ponctuelle** de la forme d'onde d'un champ magnétique à extrêmement basse fréquence, effectuée à une distance de 0,60 m du centre de la partie avant d'un écran de télévision couleur en fonctionnement de 26 *inch* (pouces), [18]. La figure D.5b donne les harmoniques du champ, fournies par un analyseur de spectre pour la forme d'onde illustrée à la figure D.5a. Il est possible de les distinguer depuis l'harmonique deux (120 Hz), qui représente 45 % de la fréquence fondamentale, jusqu'à l'harmonique 19. Il convient de noter qu'une mesure de la valeur efficace de champ, à l'aide d'un capteur de champ qui détecte uniquement la composante fondamentale, donnera une valeur trop faible, réduite de plus de 20 %.

Méthode: Il existe dans le commerce des capteurs de champ magnétique mono-axiaux et tri-axiaux qui sont parfois munis de connexions de sortie qui fournissent le signal intégré transmis par la sonde. Il est possible d'utiliser de tels instruments en association avec des

Goal (e): characterization of magnetic field intermittency

There are reports in the technical literature indicating that intermittent exposure to power frequency magnetic fields may be more effective in evoking certain biological responses than exposure to steady-state fields [7]. Such reports suggest that some index of the "ups" and "downs" (see figure D.4) of magnetic field levels may be a characteristic of the field to be quantified.

Method: Field meters that can periodically measure and record the magnetic field should be used to accomplish this goal. What is unclear is how frequently the field values should be recorded or over which time intervals they should be averaged. For example, measurements recorded every 15 s (see figure D.4) will, in general, show more fluctuations than if hourly averages are used to characterize the fluctuations [41]. Bioeffects researchers may be consulted for guidance on how to define an index of fluctuations. Because of the availability of the recorded data, different indices of fluctuations may be calculated and reported, e.g. the number of field increases and decreases (exceeding a specified percentage value) using 1 min, 2 min, etc. average field values.

Goal (f): characterizing the incidence and duration of field levels exceeding a candidate threshold value

Models that predict biological effects often assume that there is some threshold value of an agent below which, if applied, there is no effect. This model has its analogue for possible effects from exposures to magnetic fields.

Method: Field meters that periodically record the magnetic field can be used to accomplish this goal. The choice of what field level to use as the threshold value may require consultation with bioeffects researchers. As for goal (e), the availability of recorded data allows the determination of how often the measured field values exceed one or more candidate threshold values. Also, as for goal (e), the results may depend on the frequency of recording the magnetic field levels.

Goal (g): characterization of frequency content in magnetic field

Since (1) magnetic fields from electrical equipment often contain power frequency harmonics or frequencies unrelated to the power frequency, and (2) magnetic field limits have been set as a function of frequency [5], [29], characterization 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 D.5. Figure D.5a shows a **spot measurement** of the extremely low-frequency magnetic field waveform 0,60 m from the front-centre of an operating 26 inch colour television screen [18]. The harmonic components in the field are indicated in figure D.5b, which shows a spectrum analyser display for the waveform in figure D.5a. Harmonic components from the second (120 Hz), which amounts to 45 % of the fundamental, to the nineteenth can be discerned. It is noteworthy that measurement of the r.m.s. value of this field with a field meter that only detects the fundamental component will be too low by more than 20 %.

Method: Commercially available single-axis and three-axis magnetic field meters are sometimes provided with output connections that give the integrated signal from the probe.

analyseurs de spectres disponibles dans le commerce pour caractériser le contenu fréquentiel du champ magnétique. D'autre part, il existe des enregistreurs d'ondes qui sont dotés d'un programme informatique leur permettant de déterminer le contenu fréquentiel à partir des données enregistrées. Il existe également des capteurs de champ magnétique qui peuvent être commutés pour indiquer des valeurs efficaces de la fréquence industrielle et d'une ou plusieurs fréquences harmoniques.

Il convient de noter que le contenu fréquentiel des champs magnétiques produits par des équipements électriques à vitesse réglable, par exemple systèmes électriques de transports en commun, peut varier en fonction de la vitesse [13].

Objectif (h): caractérisation de la polarisation d'un champ magnétique

Une caractérisation complète du champ magnétique nécessite la détermination de sa polarisation (voir annexe C) pour une fréquence donnée. La polarisation du champ magnétique peut présenter un intérêt pour ce qui est des effets sur les êtres humains parce que, par exemple, des champs magnétiques ayant des polarisations différentes, mais la même valeur résultante (voir article D.1), peuvent induire des champs et des courants électriques dans des systèmes biologiques qui présentent des différences considérables en ce qui concerne leurs propriétés temporelles et géométriques [45].

Méthode: Il est possible d'utiliser indifféremment des capteurs de champ mono-axiaux, des capteurs de champ tri-axiaux (qui fournissent des lectures d'un axe individuel), et des systèmes tri-axiaux de détection d'ondes pour mesurer les valeurs efficaces du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse du champ magnétique afin de déterminer sa polarisation en un point dans l'espace. Comme mentionné à l'annexe C, cette procédure suppose que la mesure ne porte que sur une seule composante fréquentielle du champ magnétique. En présence d'autres fréquences, le vecteur tournant du champ magnétique ne décrit plus une simple ellipse [61], [40]. Il convient de s'attendre à des variations de la polarisation en fonction du temps et de l'emplacement.

Objectif (i): caractérisation de l'exposition des êtres humains aux champs magnétiques

Cet objectif important a été placé à la fin de la liste des objectifs dans le but de décrire d'abord les paramètres du champ magnétique susceptibles de présenter un intérêt du point de vue de l'exposition des êtres humains.

Méthode: Il convient de faire une distinction claire entre la caractérisation d'un ou de plusieurs paramètres du champ magnétique et l'exposition à ces paramètres. La meilleure détermination de ce paramètre est obtenue au moyen d'un capteur de champ miniature portable, qui enregistre périodiquement le ou les paramètres du champ étudiés dans une zone étudiée du corps humain. Il est possible de faire des estimations de l'exposition des êtres humains à un paramètre de champ donné dans une zone spécifiée à partir d'une combinaison de mesures des variations temporelles et spatiales du paramètre et à partir d'informations décrivant les types d'activités humaines dans la zone considérée (voir [12] dans le cas des champs électriques). Cette méthode ne concerne pas les expositions qui se produisent en dehors de zones où le champ est caractérisé.

Des posemètres tri-axiaux du commerce, qui peuvent être portés sur le corps humain, peuvent être utilisés pour déterminer l'exposition effective aux paramètres de champ identifiés dans les objectifs (a) à (f) pour plusieurs **bandes passantes**. De tels instruments enregistrent périodiquement la valeur du **champ magnétique résultant** pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs jours, selon la fréquence d'échantillonnage du champ magnétique, la capacité de la mémoire, et la longévité des piles. Le taux d'échantillonnage dépend en partie du modèle supposé pour l'interaction entre le champ et le sujet (voir par exemple objectifs (e) et (f)). Les données recueillies peuvent être transférées vers un ordinateur, et un logiciel fourni avec l'instrument, ou spécialement développé, est utilisé pour déterminer l'exposition aux paramètres décrits dans les objectifs (a) à (f).

Such instrumentation, in combination with commercially available spectrum analysers, can be used to characterize 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 r.m.s. field values of the power frequency and one or more harmonic frequencies are also available.

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 [13].

Goal (h): characterization of magnetic field polarization

A full characterization of the magnetic field requires a determination of its polarization (see annex C) for a given frequency. The magnetic field polarization may be of interest within the context of human exposure because, for example, magnetic fields with different polarizations but the same resultant value (see clause D.1) can induce electric fields and currents in biological systems that are significantly different in terms of their temporal and geometric properties [45].

Method: Single-axis field meters, three-axis field meters (which provide readings of an individual axis), and three-axis wave-capturing systems can all be used to measure the r.m.s. values of the semi-major and semi-minor axes of the magnetic field ellipse to determine its polarization at a point in space. As noted in annex C, this procedure assumes that only a single frequency component of the magnetic field is being measured. With the presence of other frequencies, the rotating magnetic field vector no longer traces a simple ellipse [61], [40]. Variations of the polarization as a function of time and location should be anticipated.

Goal (i): characterizing human magnetic field exposure

This important goal has been placed at the end of the listing of goals in order to first describe the magnetic field parameters which may be of interest from the viewpoint of human exposure.

Method: A clear distinction should be made between characterizing one or more magnetic field parameters and exposure to those parameters. The latter is best determined by wearing a miniature field meter that periodically records the field parameter(s) of interest at a location of interest on the body. Estimates of human exposure to a given field parameter in a specified area can be made from a combination of spatial and temporal variation measurements of the parameter and information which describes patterns of human activity in the area of interest (see [12] for discussion of the case of electric fields). This approach fails to address exposures that occur outside the areas of field characterization.

Commercially available three-axis exposure meters that can be worn on the body can be used to measure contemporary exposures to the field parameters identified in goals (a) through (f) for several **pass-bands**. 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 (e.g. see goals (e) and (f)). The collected data can be downloaded to a computer, and software provided with the instrumentation, or specially developed, is used to determine exposure to the parameters described in goals (a) through (f).

Il est possible d'évaluer les expositions passées des êtres humains aux champs magnétiques dans les zones spécifiées, en demandant aux sujets portant des posemètres de remplir les mêmes tâches que celles qu'ils auraient eu à remplir par le passé dans les zones en question [59], [60], [67]. Cette méthode suppose que les sources de champs magnétiques n'ont pas varié de façon significative dans le temps.

D.4 Exemple de protocole de mesure de champs magnétiques en vue d'évaluer l'exposition des êtres humains

L'exemple décrit ci-après est un exemple de protocole de mesure pour déterminer les effets des inductions magnétiques sur les êtres humains dans des postes. Les objectifs des mesures et les méthodes utilisées pour atteindre ces objectifs sont clairement indiqués en tant que parties intégrantes du processus d'élaboration du protocole. Il convient de noter qu'il peut y avoir des différences considérables entre les procédures de mesure décrites ci-après et celles utilisées dans d'autres environnements pour atteindre d'autres objectifs. Par exemple, on peut s'intéresser aux différents critères d'exposition et aux emplacements de mesure relatifs au corps humain, ou alors il est possible que des fréquences autres que la fréquence industrielle et les harmoniques à la fréquence industrielle aient de l'importance. Toutefois, l'exemple illustre les éléments essentiels d'un protocole destiné à caractériser l'exposition des êtres humains, c'est-à-dire une indication claire des objectifs et des exigences applicables à chaque étape du protocole de mesure. Des objectifs et des méthodes complémentaires, utilisés pour caractériser des champs magnétiques, sont traités plus en détail à l'article D.3.

NOTE – On reconnaît qu'il existe d'autres méthodes permettant d'atteindre les mêmes objectifs.

Objectif L'objectif des mesures est de déterminer si des niveaux de champs magnétiques alternatifs plus élevés que les niveaux de champs magnétiques de référence spécifiés dans le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] sont subis par des membres du personnel travaillant dans un poste du réseau électrique. Comme indiqué par le projet de norme, les paramètres de champ à caractériser sont le **champ magnétique résultant** et sa fréquence associée pour les diverses composantes fréquentielles du champ. Les zones concernées par les mesures sont les parties centrales du tronc et de la tête.

NOTE – Bien que la zone préconisée par le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] pour mesurer des champs magnétiques non uniformes soit la zone moyenne occupée par la tête ou le tronc de la personne, des mesures effectuées aux centres de ces régions sont également admises si la première solution est impossible. Dans le protocole décrit ci-après, les valeurs situées à peu près aux centres des volumes sont prises en compte car le personnel n'est pas strictement immobile.

Les critères de conformité aux exigences du projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] exigent que chaque composante de champ, E_i et B_j , soit respectivement inférieure aux niveaux de référence associés, E_{RLi} et B_{RLj} . Ici, E_i et E_{RLi} sont les valeurs (efficaces) du champ électrique à la $i^{\text{ème}}$ fréquence et B_j et B_{RLj} sont les amplitudes correspondantes du champ magnétique. En outre,

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{RLi}} \leq 1 \quad 0 \leq f \leq 60 \text{ Hz} \quad (17)$$

$$\sum_j \frac{B_j}{B_{RLj}} \leq 1$$

et

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{RLi}} + \sum_j \frac{B_j}{B_{RLj}} \leq 1 \quad 60 \text{ Hz} < f < 700 \text{ kHz} \quad (18)$$

Past human exposures in specified areas can be estimated by having surrogates wearing exposure meters perform activities that were conducted in the past in the specified areas [59], [60], [67]. This approach assumes that the magnetic field sources have not changed significantly over time.

D.4 Example of a magnetic field measurement protocol for human exposure

An example measurement protocol for determining human exposure to magnetic flux densities in substations is described below. As part of the process of developing the protocol, the measurement goals and methods for achieving them are clearly indicated. It should be noted that the measurement procedures described below may differ significantly from those used in other environments with other goals. For example, different exposure criteria and measurement locations relative to the human body may be of interest, or frequencies other than the power frequency and power frequency harmonics may be important. The example, however, does illustrate the essential elements of a measurement protocol for characterizing human exposure, i.e. a clear indication of the goals and the step-by-step requirements of the measurement protocol. Further discussion of goals and methods used for characterizing magnetic fields is provided in clause D.3.

NOTE – It is recognized that there are other methods for accomplishing the same measurement goals.

Goal The goal of the measurements is to determine whether larger than reference alternating magnetic field levels indicated in the CENELEC Prestandard ENV 50166-1 [5] are experienced by personnel working in an electric power system substation. As indicated by the prestandard, the field parameters to be characterized are the **resultant magnetic field** and associated frequency for the various frequency components in the field. The measurement locations of interest are the centres of the trunk and head.

NOTE – While the CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5] preferred measurement location for non-uniform magnetic fields is the average over the person's head or trunk, measurements at the centres of these regions are also permitted if the former is not possible. In the protocol described below, the values approximately at the centres of the volumes are considered because the personnel is not strictly stationary.

The criteria for compliance with the CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5] are that each field component, E_i and B_j , shall be less than the associated reference levels, E_{RLi} and B_{RLj} , respectively. Here E_i and E_{RLi} are the (r.m.s.) electric field values at the i th frequency, and B_j and B_{RLj} are the corresponding magnetic field quantities. In addition,

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{RLi}} \leq 1 \quad 0 \leq f \leq 60 \text{ Hz} \quad (17)$$

$$\sum_j \frac{B_j}{B_{RLj}} \leq 1$$

and

$$\sum_i \frac{E_i}{E_{RLi}} + \sum_j \frac{B_j}{B_{RLj}} \leq 1 \quad 60 \text{ Hz} < f < 700 \text{ kHz} \quad (18)$$

Dans l'exemple de protocole considéré, les niveaux de référence E_{RLj} et B_{RLj} sont respectivement donnés par les relations $(1\ 500/f)$ kV/m et $(80/f)$ mT, où f est la fréquence. Seules doivent être incluses dans les sommations, les fréquences pour lesquelles $E_j/E_m \geq 0,3$ et $B_j/B_m \geq 0,3$, où E_m et B_m sont respectivement les plus grandes contributions de E_j et de B_j .

NOTE – Lorsque le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] sera remplacé par une révision approuvée, il n'est pas impossible que le protocole suivant nécessite des ajustements tenant compte de nouvelles exigences.

On suppose les conditions suivantes: les tâches journalières du personnel exigent qu'il se déplace dans le poste, parfois au niveau du sol, et qu'il travaille également en position assise; les emplacements des sources de champs magnétiques sont généralement connus; et la température et l'humidité relative sont comprises dans les limites des plages indiquées en 5.1.4. On suppose également que le plus grand harmonique de la fréquence industrielle, dont l'amplitude peut être significative, est inférieure au 7^{ème}. Les contributions du champ électrique aux sommations dans les équations (17) et (18) sont traitées à l'article E.4, mais ne sont pas prises en compte dans le protocole suivant.

Méthode En premier lieu, il convient d'effectuer une enquête préliminaire pour caractériser la distribution spatiale de l'induction magnétique, en vue d'identifier les endroits où les niveaux des champs sont les plus élevés. Il est possible d'effectuer des **mesures ponctuelles** du **champ magnétique résultant** ou du **champ magnétique maximal** au cours de ce contrôle préliminaire. Il convient d'effectuer les **mesures ponctuelles** lorsque l'utilisation de l'énergie électrique est proche des niveaux maximaux, c'est-à-dire lorsque les courants de charge sont élevés. A partir de ce contrôle et/ou de la connaissance des positions des sources de champs magnétiques, il est possible d'identifier des endroits dans lesquels il convient d'effectuer des mesures plus complètes. En ce qui concerne les emplacements dans lesquels des mesures plus complètes sont effectuées, il convient que les points suivants s'appliquent:

- il convient d'utiliser des instruments tri-axiaux pour mesurer et enregistrer le **champ magnétique résultant** en fonction du temps et de la fréquence. Pour cela, il est possible d'utiliser des capteurs de champ ayant plusieurs **bandes passantes** suffisamment étroites qui peuvent être réglés pour effectuer la mesure à la fréquence industrielle et à ses harmoniques. Il est également possible d'utiliser des capteurs de champ munis de connexions de sortie adaptées pour permettre de les raccorder aux analyseurs de spectres, ou à des instruments qui enregistrent la forme d'onde du champ à une cadence suffisamment élevée et qui réalisent une analyse de Fourier à partir des valeurs enregistrées (voir article D.1 pour les descriptions des instruments);

NOTE – Lorsqu'il y a assez de raisons pour penser qu'il y a une composante fréquentielle dominante dans le champ et que toutes les autres composantes fréquentielles sont suffisamment faibles pour répondre aux critères applicables spécifiés dans le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5] (c'est-à-dire les densités des courants induits remplissent la condition $J/J_{\max} < 0,3$ et les inégalités correspondantes existent pour B et E), il est permis de mesurer le champ à l'aide d'un instrument à **réponse en fréquence** plate, tel que spécifié en 5.1.3 et 5.5.1 de la présente norme.

- il est souhaitable que la résolution spectrale des instruments soit de $0,2 f$ à la fréquence f ;
- il est souhaitable que la dynamique des instruments aille au moins du niveau de référence du 7^{ème} harmonique de la fréquence industrielle [(80/7^{ème} fréquence harmonique) mT] jusqu'au niveau de référence de la fréquence industrielle [(80/fréquence industrielle) mT];
- il est souhaitable que la plage de fréquences convienne pour caractériser le champ à la fréquence industrielle et les harmoniques jusqu'au 7^{ème} harmonique;
- il est souhaitable que l'incertitude des instruments soit inférieure à $\pm 10\%$ (**facteur de couverture 2**);
- la surface recommandée pour la sonde est égale ou inférieure à $0,01\text{ m}^2$;
- si les sources de champs magnétiques sont situées à environ 1 m ou moins de l'emplacement où sont effectuées les mesures, il convient de tenir compte des **incertitudes de mesure** dues aux effets de moyennage des **bobines** (voir article B.1 et tableau B.1). Dans des champs non uniformes, il convient d'indiquer les dimensions de la sonde et de faire une évaluation des effets dus au moyennage des sondes, si ces effets sont significatifs;

In the example protocol that is considered, the reference levels E_{RLi} and B_{RLj} are given by the relations $(1\ 500/f)$ kV/m and $(80/f)$ mT, respectively, where f is the frequency. Only frequencies for which $E_j/E_m \geq 0,3$ and $B_j/B_m \geq 0,3$ need be included in the summations, where E_m and B_m are the largest of the E_j and B_j contributions, respectively.

NOTE – When CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5] is superseded by an approved revision, the following protocol may require adjustments to accommodate new requirements.

The following conditions are assumed: the daily duties of the personnel require them to move about the substation, occasionally at ground level, as well as being seated. The locations of the magnetic field sources are generally known, and the temperature and relative humidity are within the ranges specified in 5.1.4. It is further assumed that highest power frequency harmonic that may be significant in magnitude is less than the 7th. The contributions of the electric field to the summations in equations (17) and (18) are considered in E.4, but are not taken into account in the following protocol.

Method Initially, a preliminary survey carried out to characterize the spatial distribution of the magnetic flux density should be performed with the aim of identifying the locations with the highest field levels. **Spot measurements of the resultant magnetic field or maximum magnetic field** may be performed during this preliminary survey. The **spot measurements** should be performed when electricity usage is near maximum levels, i.e. when load currents are high. From this survey and/or knowledge of the positions of magnetic field sources, locations can be identified where more comprehensive measurements should be made. For those locations where more comprehensive measurements are performed, the following should apply:

- three-axis instrumentation should be used to measure and record the **resultant magnetic field** as a function of time and frequency. This may be done using field meters with several sufficiently narrow frequency **pass-bands** that can be tuned to in order to measure the power frequency and power frequency harmonics, field meters with suitable outputs that can be connected to spectrum analysers, and instrumentation that logs the field waveform at a sufficiently rapid rate and performs a Fourier analysis of the logged values (see clause D.1 for instrument descriptions);

NOTE – Where there are adequate grounds for believing that there is one dominant frequency component in the field and that all other frequency components are sufficiently small to satisfy the relevant criteria in the CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5] (i.e. induced current densities satisfy $J_i/J_{\max} < 0,3$ and corresponding inequalities exist for B and E), it is acceptable to measure the field using an instrument with a flat **frequency response** as specified in 5.1.3 and 5.5.1 of this standard.

- the spectral resolution of the instrumentation should be $0,2 f$ at frequency f ;
- the magnitude range of the instrumentation should extend at least from the reference level of the power frequency 7th harmonic [(80/7th harmonic frequency) mT] to the reference level of the power frequency [(80/power frequency) mT];
- the frequency range of the instrumentation should be adequate for characterizing the power frequency field and harmonics up to the 7th harmonic;
- the **measurement uncertainty** of the instrumentation should be less than $\pm 10\%$ (**coverage factor** of 2);
- the recommended area of the probe is $0,01\text{ m}^2$ or smaller;
- if magnetic field sources are approximately 1 m or less away from the measurement location, consideration should be given to **measurement uncertainties** due to the averaging effects of **coil probes** (see clause B.1 and table B.1). In non-uniform fields, the dimensions of the probe should be reported and estimates of effects due to probe averaging should be described if significant;

- il convient de positionner la sonde tri-axiale à peu près aux emplacements prévus pour le centre du tronc et de la tête, et il convient d'utiliser la plus élevée des deux valeurs pour déterminer l'emplacement qui nécessite des mesures plus exhaustives;
- afin de recueillir des informations sur les variations temporelles, il convient d'enregistrer les mesures au moins toutes les 30 secondes sur des périodes de 24 h, pendant plusieurs jours, alors que l'utilisation de l'énergie électrique est à un niveau maximum ou à un niveau proche du maximum;

NOTE – Partout où le champ est engendré par une source dominante unique et où les courants de charge sont connus en fonction du temps, les résultats des **mesures ponctuelles** et la connaissance de la variation temporelle des courants de charge peuvent servir à déterminer les inductions magnétiques en fonction du temps.

- il convient d'utiliser les données enregistrées pour calculer et documenter la durée des niveaux d'induction magnétique aux différentes fréquences et aux différents emplacements. Il est possible de donner d'autres informations statistiques, si celles-ci présentent un intérêt (voir 5.4);
- l'exposition des êtres humains aux champs magnétiques supérieurs aux niveaux de référence du CENELEC sont *estimés* en identifiant les coïncidences entre les périodes de la journée durant lesquelles des membres du personnel sont présents à un emplacement donné et les périodes de la journée durant lesquelles le niveau du champ magnétique est égal ou supérieur au niveau de référence au même emplacement. Il convient d'utiliser les données pour vérifier la conformité au critère donné par la sommation des champs magnétiques dans l'équation (17);
- il convient de fournir des croquis qui feront partie intégrante de la documentation relative aux résultats de mesure; ces croquis doivent représenter les zones où les mesures sont effectuées; il est souhaitable que les emplacements des points de mesure soient clairement indiqués, avec par exemple un «x» ou «•»; il convient également d'indiquer le fabricant de l'instrument, le modèle de l'instrument, son numéro de série, l'**incertitude de mesure** totale (**facteur de couverture 2**), la date du dernier étalonnage ou de la dernière vérification de l'étalonnage, les heures et dates des mesures, les conditions atmosphériques, et la ou les personnes qui ont effectué les mesures.

- the three-axis probe should be positioned approximately at the locations of the centre of the trunk and head, and the higher of the two values should be used for determining the location for more comprehensive measurements;
- to acquire information on the temporal variations, the measurements should be recorded at least every 30 s over 24 h periods during several days when electricity usage is near or at a maximum;

NOTE – At those locations where the field is due to a single dominant source and for which the load currents are known as a function of time, the results of the **spot measurements** and knowledge of the temporal variation of the load currents may be used for determining the magnetic flux densities as a function of time.

- the recorded data should be used to calculate and document the duration of magnetic flux density levels at the different frequencies and locations. Other statistical information may be reported if considered of interest (see 5.4);
- human exposure to the magnetic fields in excess of the CENELEC reference levels are *estimated* by identifying coincidences between the times of day when personnel is present at a given location and the times of day when the magnetic field level equals or exceeds the reference level at the same location. The data should also be used to check for compliance with the criterion given by the magnetic field summation in equation (17);
- as part of the documentation for the measurement results, sketches should be provided of the areas where measurements are performed. The locations of the measurement points should be clearly indicated, e.g. with an "x" or "•". The instrument manufacturer, instrument model, serial number, total **measurement uncertainty (coverage factor 2)**, date of last calibration or calibration verification, time and dates of the measurements, weather conditions, and the person or persons performing the measurements should be indicated.

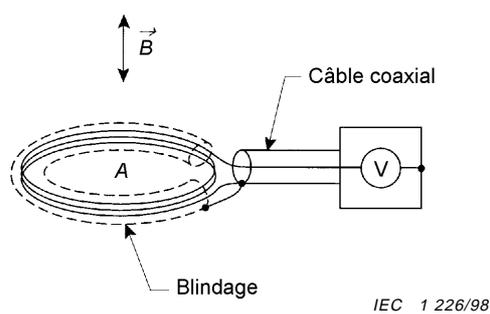
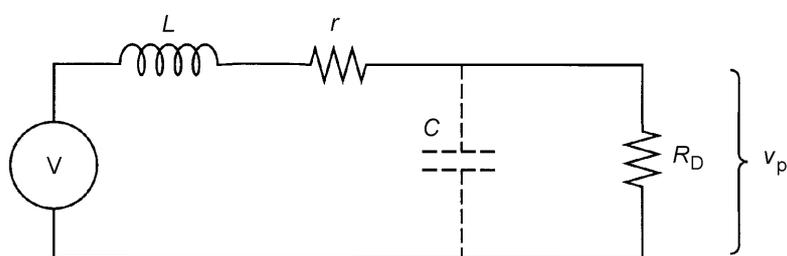


Figure D.1 – Vue schématique d'un simple capteur de champ magnétique muni d'une bobine



Légende

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

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

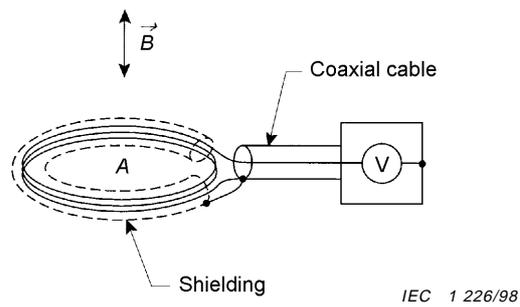
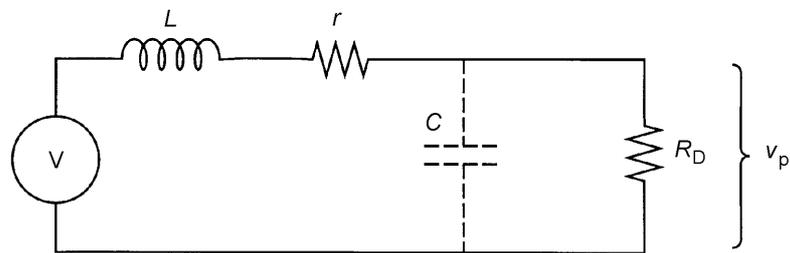


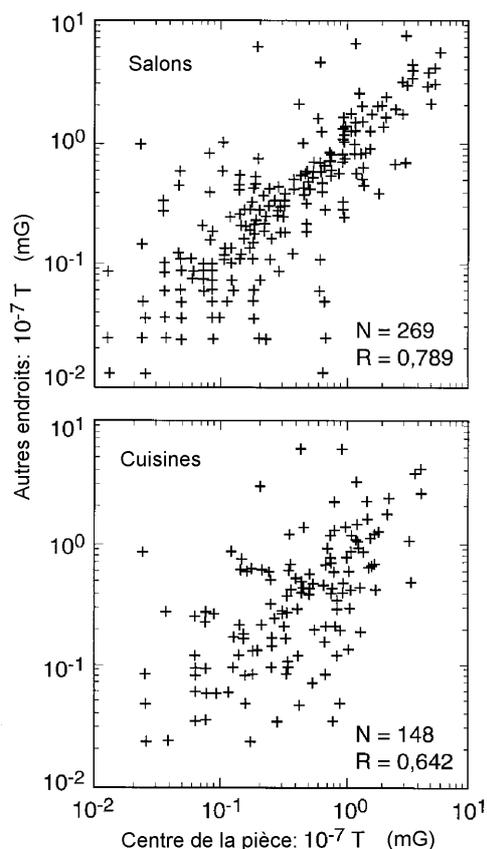
Figure D.1 – Schematic view of simple magnetic field meter with coil-type probe



Key

- L coil inductance
- r wire resistance
- C stray capacitance
- R_D input impedance of detector

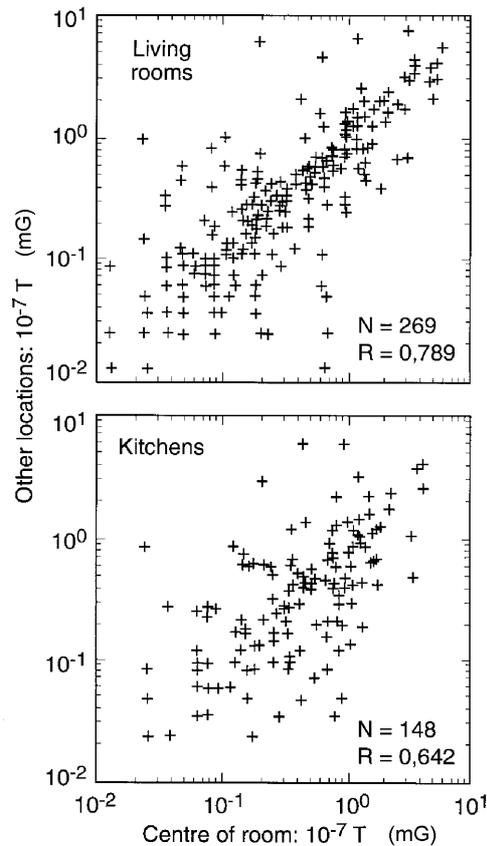
Figure D.2 – Approximate equivalent circuit of a coil probe when connected to the detector



IEC 1 228/98

Chaque point de mesure représente des mesures effectuées en deux emplacements dans le même local. Une mesure est effectuée au centre du local (abscisse) et l'autre mesure est effectuée à un autre endroit (ordonnée), l'emplacement n'étant pas spécifié. Les coefficients de corrélation sont respectivement de 0,789 et de 0,642 pour les salles de séjour et les cuisines. Pour un coefficient de corrélation de 1, tous les points de mesure tomberaient sur la même diagonale.

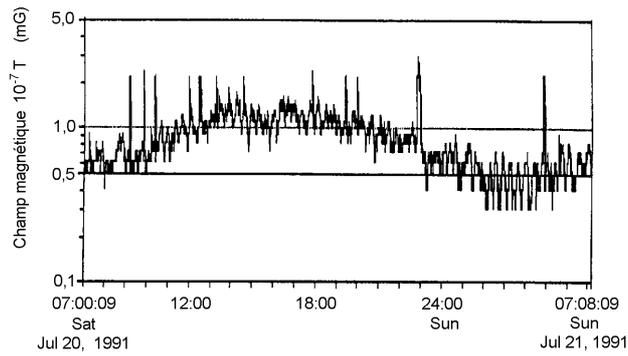
Figure D.3 – Courbes de dispersion montrant le champ magnétique au centre d'un local par rapport à d'autres points dans le même local pour des salles de séjour et des cuisines au cours d'une enquête qui a porté sur 77 domiciles (voir [62])



IEC 1 228/98

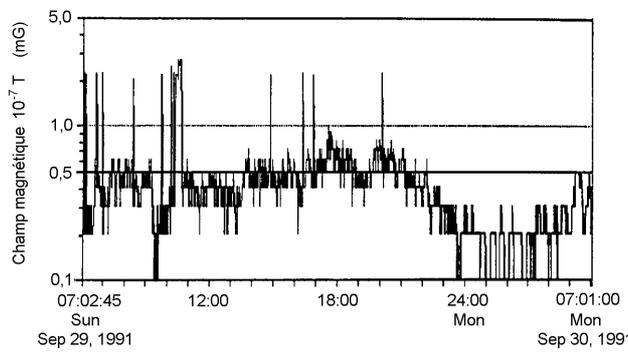
Each datum point represents measurements at two locations in the same room. One measurement is performed at the centre of the room (abscissa) and the other measurement is performed elsewhere (ordinate) with the location unspecified. The correlation coefficients are 0,789 and 0,642 for living rooms and kitchens, respectively. All the data points would lie on the same diagonal line for a correlation coefficient of 1.

Figure D.3 – Scatter plots showing the magnetic field at the centre of a room versus other points in the same room for living rooms and kitchens during survey of 77 homes, after [62]



IEC 1 229/98

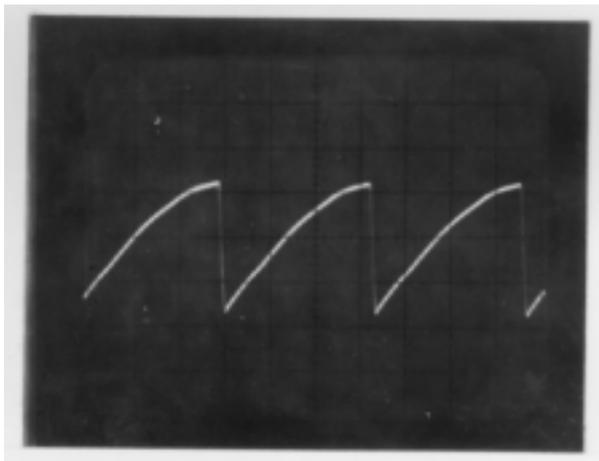
Figure D.4a – Mesures dans une atmosphère chaude et humide



IEC 1 230/98

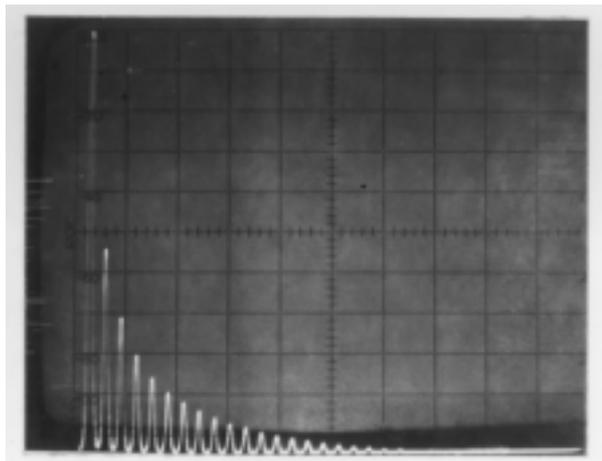
Figure D.4b – Mesures dans une atmosphère fraîche et sèche

Figure D.4 – Mesures, durant 24 h, d'un champ magnétique au centre d'une salle de séjour



IEC 1 231/98

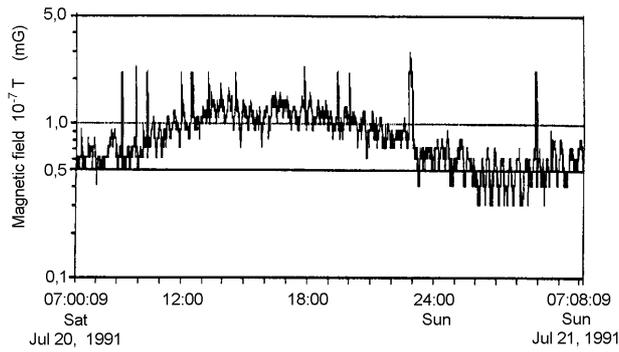
Figure D.5a – Oscillogramme de la forme d'onde d'un champ magnétique; valeur efficace = 0,17 μ T (échelle verticale = 0,2 μ T; échelle horizontale = 5 ms/div)



IEC 1 232/98

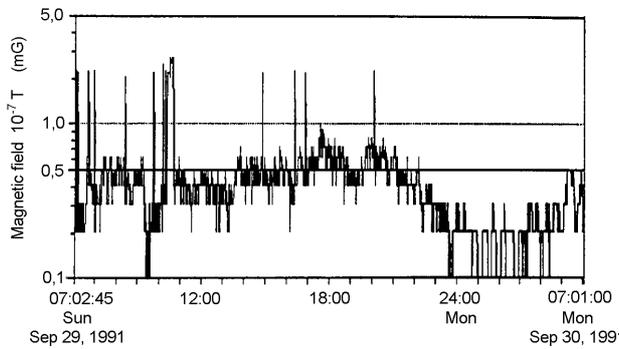
Figure D.5b – Spectre normalisé visualisé sur un analyseur de spectre pour la forme d'onde présentée en D.5a (200 Hz/div)

Figure D.5 – Oscillogramme de la forme d'onde d'un champ magnétique obtenu dans un logement, à 0,60 m de la partie centrale avant d'un écran de télévision de 26 inch (pouces), en fonctionnement et spectre correspondant obtenu via un analyseur de spectre



IEC 1 229/98

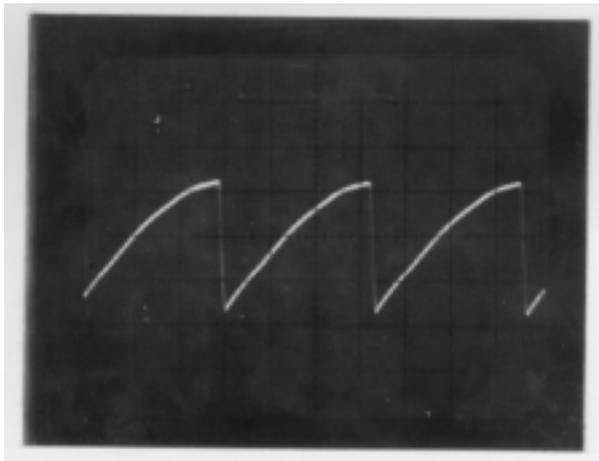
Figure D.4a – Measurements during hot humid weather



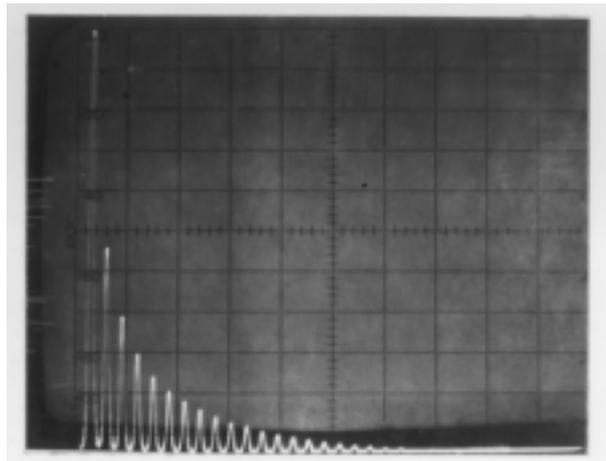
IEC 1 230/98

Figure D.4b – Measurements during cool dry weather

Figure D.4 – 24 h measurements of the magnetic field at the centre of a living room



IEC 1 231/98



IEC 1 232/98

Figure D.5a – Oscilloscope display of magnetic field waveform; r.m.s. value = 0,17 μ T (vertical scale = 0,2 μ T/div; horizontal scale = 5 ms/div)

Figure D.5b – Normalized spectrum analyser display for waveform shown in figure D.5a (200 Hz/div)

Figure D.5 – Oscilloscope display of magnetic field waveform at a distance of 0,60 m from the front centre of an operating 26 inch screen colour television, and associated spectrum analyser display

Annexe E (informative)

Capteurs de champ électrique – Recommandations pour les mesures

E.1 Caractéristiques générales des capteurs de champ électrique

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

- a) le **capteur d'espace libre**;
- b) le **capteur de paroi**;
- c) le **capteur électro-optique**.

Lorsque des mesures du champ électrique sont effectuées, il convient que l'observateur se tienne suffisamment loin de la sonde pour éviter de perturber de façon significative le champ à l'emplacement de la sonde (voir article B.2.1). Il est souhaitable que les dimensions des **capteurs d'espace libre** et des **capteurs électro-optiques** soient suffisamment faibles pour que la taille de la sonde ne perturbe pas de façon significative les distributions des charges sur les surfaces voisines qui génèrent le champ électrique, c'est-à-dire des surfaces sous tension et mises à la terre. Bien que les capteurs de champ soient étalonnés dans des champs électriques pratiquement uniformes, il n'est pas nécessaire que le champ mesuré soit très uniforme (voir article B.2.8). Les capteurs de champ électrique mesurent la projection du vecteur oscillant (polarisation linéaire) ou tournant (polarisation elliptique ou circulaire) du champ électrique sur l'axe électrique de la sonde (l'axe présentant la plus grande sensibilité au champ électrique). Il existe des **capteurs d'espace libre** tri-axiaux pour mesurer le **champ électrique résultant**.

E.2 Théorie de fonctionnement

E.2.1 Capteurs d'espace libre

Les **capteurs d'espace libre** déterminent le champ électrique en mesurant le courant induit ou la charge induite oscillant entre les moitiés conductrices (électrodes) d'une sonde isolée électriquement, après l'introduction de la sonde dans le champ électrique. Pour des **capteurs d'espace libre** disponibles dans le commerce, le détecteur est habituellement contenu dans la sonde ou fait partie intégrante de celle-ci. La sonde et le détecteur sont maintenus dans le champ électrique à l'extrémité d'une perche isolante [11], [27]. Le **capteur d'espace libre** convient pour des mesures de contrôle parce qu'il est portatif, qu'il permet d'effectuer des mesures au-dessus du niveau du sol, et qu'il ne nécessite pas un potentiel de référence de terre. Il existe dans le commerce des **capteurs d'espace libre** mono-axiaux et tri-axiaux. Les **capteurs d'espace libre** sont normalement alimentés par des piles.

Il existe également des **capteurs d'espace libre** conçus pour un affichage à distance du champ électrique. Dans ce cas, une partie du circuit de traitement du signal est contenue dans la sonde et la partie restante du détecteur est placée dans une enceinte séparée munie d'un dispositif d'affichage analogique ou numérique. Une liaison par fibre optique relie la sonde au dispositif d'affichage [19], [34].

Annex E (informative)

Electric field strength meters (electric field meters) – Guidance for measurements

E.1 General characteristics of electric field meters

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

- a) the **free-body meter**;
- b) the **ground reference meter**;
- c) the **electro-optic meter**.

When measurements of the electric field strength are performed, the observer should be sufficiently removed from the probe to avoid significant perturbation of the field at the location of the probe (see clause B.2.1). **Free-body** and **electro-optic meters** should be sufficiently small so that the size of the probe does not significantly perturb the charge distributions on boundary surfaces generating the electric field, i.e. energized and grounded surfaces. Although field meters are calibrated in nearly uniform electric fields, the field that is measured need not be very uniform (see clause B.2.8). Electric field meters measure the projection of the oscillating (linearly polarized) or rotating (elliptically or circularly polarized) electric field vector onto the electrical axis of the probe (the axis of greatest electric field sensitivity). Three-axis **free-body electric field meters** are available for measuring the **resultant electric field**.

E.2 Theory of operation

E.2.1 Free-body meters

Free-body meters determine the electric field strength by measuring the steady-state induced current or charge oscillating between the conducting halves (electrodes) of an electrically isolated probe, after the probe has been introduced into the electric field. For commercially available **free-body meters**, the detector is usually contained in or is an integral part of the probe. The probe and detector are supported in the electric field at the end of an insulating handle [11], [27]. The **free-body meter** is suitable for survey type measurements because it is portable, allows measurements above the ground plane, and does not require a ground reference potential. Single-axis and three-axis **free-body meters** are commercially available. **Free-body meters** are normally battery-powered.

There are also **free-body meters** designed for remote display of the electric field strength. In this case, a portion of the signal-processing circuit is contained in the probe and the remainder of the detector is in a separate enclosure with an analogue or digital display. A fibre-optic link connects the probe to the display unit [19], [34].

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

$$Q = \int_{S/2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dA \quad (19)$$

où

\mathbf{D} est le déplacement électrique;

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

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

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

$$Q = 3\pi a^2 \varepsilon_0 E \quad (20)$$

où

ε_0 est la permittivité de vide;

a est le rayon de la sphère [58].

NOTE – La densité de charge superficielle est donnée par la formule $3\varepsilon_0 E \cos\theta$. L'intégration sur l'hémisphère donne l'équation (20) (voir [58]).

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

$$Q = k \varepsilon_0 E \quad (21)$$

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

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

$$I = \frac{dQ}{dt} = k\omega\varepsilon_0 E_0 \cos\omega t \quad (22)$$

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

S'il y a des harmoniques dans le champ électrique, il y aura un terme supplémentaire dans le membre de droite de l'équation (22) pour chaque harmonique. En raison de l'opération de différentiation dans l'équation (22), chacun des termes supplémentaires sera pondéré par le rang de l'harmonique associée. Comme dans le cas du capteur de champ magnétique (voir article D.2), il est nécessaire que le détecteur effectue l'opération mathématique inverse, à savoir l'intégration, pour restituer la forme d'onde du champ électrique. Pour cela, on introduit un étage d'intégration. Par exemple, un amplificateur d'intégration ou un circuit intégrateur passif combiné à un voltmètre pourrait servir de détecteur. Il convient de rendre plate, sur toute la plage de fréquences étudiée, la **réponse en fréquence** de l'ensemble constitué de la sonde et du circuit intégrateur. Il convient d'utiliser des filtres pour exclure des signaux de la plage de fréquences étudiée.

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

$$Q = \int_{S/2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dA \quad (19)$$

where

\mathbf{D} is the electric displacement;

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

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

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

$$Q = 3\pi a^2 \varepsilon_0 E \quad (20)$$

where

ε_0 is the permittivity of free space;

a is the radius of the sphere [58].

NOTE – The surface charge density is given by $3\varepsilon_0 E \cos\theta$. Integration over the hemisphere gives equation (20) (see [58]).

For less symmetric geometries, the result can be expressed as

$$Q = k \varepsilon_0 E \quad (21)$$

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

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

$$I = \frac{dQ}{dt} = k\omega\varepsilon_0 E_0 \cos\omega t \quad (22)$$

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

If there are harmonics in the electric field, there will be an additional term on the right side of equation (22) for each harmonic. Because of the differentiation operation in equation (22), each of the additional terms will be weighted by the associated harmonic number. As in the case of the magnetic field meter (see clause D.2), it is necessary for the detector to perform the inverse mathematical operation, namely integration, to recover the electric field waveform. This is accomplished by introducing a stage of integration. For example, an integrating amplifier or a passive integrating circuit combined with a voltmeter could be used as a detector. The **frequency response** of the probe-integrating detector combination should be made flat over the frequency range of interest. Filters should be used to exclude signals outside of the frequency range of interest.

E.2.2 Capteurs de paroi

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

$$Q = \varepsilon_0 EA \quad (23)$$

où

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

ε_0 est la permittivité du vide.

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

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega \varepsilon_0 E_0 A \cos \omega t \quad (24)$$

S'il y a des harmoniques dans le champ électrique, il y aura à nouveau un terme supplémentaire dans le second membre de l'équation (24) pour chaque harmonique. Comme en E.2.1, en raison de l'opération de différenciation, chacun des termes supplémentaires est pondéré par le rang de l'harmonique associée. Pour restituer la forme d'onde du champ électrique, il est nécessaire que l'opération mathématique inverse soit effectuée, à savoir, l'intégration. Il est possible d'utiliser comme détecteur, un ensemble constitué d'un circuit intégrateur et d'un voltmètre et produisant une **réponse en fréquence uniforme** sur toute la plage de fréquences étudiée. Il convient d'utiliser des filtres faisant partie intégrante du circuit détecteur pour exclure des signaux extérieurs à la plage de fréquences étudiée. Les **capteurs de paroi** peuvent être alimentés par piles ou par secteur.

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

E.2.3 Capteurs électro-optiques

Le **capteur électro-optique** étudié dans la présente norme utilise une sonde qui présente l'effet Pockels quand elle est introduite dans le champ électrique. Ce type de capteur de champ est similaire au **capteur d'espace libre** parce qu'il convient pour des mesures de contrôle, qu'il permet d'effectuer des mesures au niveau de la plupart des points situés au-dessus du plan du sol, et qu'il ne nécessite pas un potentiel de référence de terre. La sonde, qui est séparée du détecteur, peut être maintenue dans le champ au moyen d'une perche isolante. La sonde et le détecteur sont reliés par des fibres optiques par l'intermédiaire desquelles la lumière est transmise du détecteur à la sonde et inversement. En général, les sondes ont une faible dimension ($\sim 0,02$ m) par rapport aux sondes des **capteurs d'espace libre**, et ce faible encombrement des sondes permet d'effectuer des mesures plus près des surfaces conductrices en raison des interactions plus faibles avec les distributions de charges superficielles. Cependant, si les sondes à effet Pockels ont de plus faibles dimensions, elles sont moins sensibles aux champs électriques (~ 5 kV/m et plus) que les **capteurs d'espace libre** (~ 1 V/m et plus) et leur coût de fabrication est plus élevé.

E.2.2 Ground reference meters

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

$$Q = \varepsilon_0 EA \quad (23)$$

where

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

ε_0 is the permittivity of free space.

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

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega \varepsilon_0 E_0 A \cos \omega t \quad (24)$$

If there are harmonics in the electric field, there will again be an additional term on the right hand side of equation (24) for each harmonic. As in E.2.1, because of the differentiation operation, each of the additional terms will be weighted by the associated harmonic number. To recover the electric field waveform, it is necessary to perform the inverse mathematical operation, namely integration. An integrating circuit/voltmeter combination that produces a flat **frequency response** over the frequency range of interest can serve as the detector. Filters should also be part of the detector circuit to exclude signals from outside the frequency range of interest. **Ground reference meters** may be battery or mains-operated.

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

E.2.3 Electro-optic meters

The **electro-optic field meter** considered in this standard employs a probe that exhibits the Pockels effect when introduced into the electric field. This type of field meter is similar to the **free-body meter** in that it is suitable for survey type measurements, allows measurements at most points above the ground plane, and does not require a ground reference potential. The probe, which is separate from the detector, can be supported in the field with an insulating handle. The probe and detector are connected with optical fibres through which light from the detector is routed to and from the probe. In general, the probes are small in dimension (~0,02 m) compared to **free-body meter** probes and this enables measurements to be taken closer to conducting surfaces because of the smaller interactions with the surface charge distributions. However, while smaller in size, Pockels effect probes have less sensitivity to electric fields (~5 kV/m and higher) compared to **free-body meters** (~1 V/m and higher) and are more expensive to fabricate.

La figure E.3 montre un croquis représentant une sonde à effet Pockels ainsi que ses éléments constituants. La lumière est transmise du détecteur vers la sonde et inversement par l'intermédiaire de fibres optiques. Le champ électrique E induit une biréfringence dans un cristal diélectrique (Pockels) correctement orienté, qui entraîne une modulation de l'intensité de la lumière polarisée linéairement selon la relation [21]

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{[1 + \sin(E' / F)]}{2} \quad (25)$$

où

I_t est la lumière transmise;

I_i est la lumière incidente;

E' est le champ électrique dans le cristal;

F est égal à $\lambda/2\pi n^3 c_e l$;

λ est la longueur d'onde de la lumière;

n est l'indice de réfraction;

l est l'épaisseur du cristal;

c_e est le coefficient électro-optique du cristal.

Pour que l'équation (25) soit valable, on suppose que le cristal n'a pas d'activité optique propre.

L'équation (25) montre que l'amplitude de la modulation de la lumière dépend du champ électrique dans le cristal, qui est lui-même dépendant du champ externe E . Etant donné que la transmission de la lumière suit la forme d'onde du champ électrique, la présence d'un étage d'intégration n'est pas nécessaire dans le détecteur pour que celui-ci puisse traiter correctement les signaux dus aux harmoniques éventuellement présents dans le champ électrique. Le cristal de Pockels est parfois revêtu d'électrodes transparentes permettant de mesurer la tension par l'effet Pockels. Les **capteurs électro-optiques** peuvent être alimentés par piles ou par secteur.

E.3 Objectifs et méthodes de mesure

Dans le but d'aider les lecteurs qui souhaitent élaborer un protocole de mesure de champs électriques, le présent article décrit les différentes méthodes de mesure des champs électriques qui permettent d'atteindre des objectifs spécifiques. Il est souhaitable que le lecteur se reporte également à l'article D.3 qui contient les détails nécessaires à l'élaboration d'un programme de mesure de champs magnétiques, détails qui sont également applicables aux mesures des champs électriques. Par exemple l'exigence selon laquelle les objectifs des mesures doivent être définis assez tôt et la possibilité de réaliser une étude pilote, s'appliquent également pour les mêmes raisons que précédemment mentionnées.

La détermination directe de l'exposition des êtres humains aux champs électriques est encore plus complexe que la détermination de l'exposition aux champs magnétiques, car il est très difficile de se procurer des **dosimètres** mono-axiaux miniatures, capables de mesurer et d'enregistrer le champ électrique à la surface du corps [6]. Par ailleurs, compte tenu des perturbations du champ électrique par le corps, les valeurs de champ enregistrées sont très sensibles à l'emplacement du capteur de champ sur le corps et à l'orientation du corps. De tels instruments ont été utilisés pour déterminer des «facteurs de renforcement» du champ électrique en des emplacements spécifiques sur la surface du corps, c'est-à-dire le rapport entre le champ électrique perturbé à la surface du corps et le champ électrique non perturbé, pour différents emplacements et différentes orientations du corps dans un champ électrique vertical [6].

NOTE – On dispose également de documents qui décrivent un système de mesure d'exposition utilisant un gilet électriquement conducteur en tant que sonde pour capter un champ moyen pour la région supérieure du corps [12].

Figure E.3 shows a sketch of a Pockels effect probe and its constituent components. Light originating from the detector is sent to and from the probe via optical fibres. The electric field E induces a birefringence in an appropriately oriented dielectric (Pockels) crystal that causes the intensity of the linearly polarized light to be modulated according to [21]:

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{[1 + \sin(E' / F)]}{2} \quad (25)$$

where

I_t is the transmitted light;

I_i is the incident light;

E' is the electric field in the crystal;

F is equal to $\lambda/2\pi n^3 c_e l$;

λ is the wavelength of light;

n is the index of refraction;

l is the crystal thickness;

c_e is the electro-optic coefficient of the crystal.

For equation (25) to hold, it is assumed that the crystal has no intrinsic optical activity.

Equation (25) shows that the amplitude of light modulation is a function of the electric field in the crystal which, in turn, is dependent on the external field E . Because the light transmission tracks the waveform of the electric field, a stage of integration is unnecessary in the detector to appropriately process signals due to harmonics that may be present in the electric field. The Pockels crystal is sometimes coated with transparent electrodes to permit measurements of voltage using the Pockels effect. **Electro-optic meters** may be battery or mains-operated.

E.3 Measurement goals and methods

As an aid for readers interested in developing an electric field measurement protocol, this clause describes different electric field measurement methods that can accomplish specific measurement goals. The reader should also refer to clause D.3 as many of the points made for developing a magnetic field measurement plan are applicable to electric field measurements. For example, the requirement that measurement goals be defined early and the possibility of conducting a pilot study apply for the same reasons as previously stated.

Direct measurement of human exposure to electric fields is more complicated than determining magnetic field exposure, because miniature single-axis exposure meters that measure and record the electric field at the surface of the body [6], are not readily available. Also, because of the perturbations of the electric field by the body, the recorded field values are very sensitive to the field meter location on the body and to body orientation. Such instrumentation has been used to determine electric field "enhancement factors" at specific locations on the surface of the body, i.e. the ratio of perturbed electric field at the surface of the body to unperturbed electric field, for different locations and orientations of the body in a vertical electric field [6].

NOTE – An exposure measurement system which employs an electrically conducting vest as the probe to sense an average field for the upper body region is also described in the literature [12].

Des facteurs de renforcement pour les êtres humains et les animaux dans des champs électriques verticaux ont été également signalés par d'autres chercheurs [11], [66]. Les facteurs de renforcement ont été utilisés pour tenir compte du **facteur d'échelle** entre les différentes espèces animales lors de l'élaboration de programmes d'études des effets biologiques *in vivo*. La caractérisation du champ électrique non perturbé, suivie de la mise à l'échelle des champs pour des études biologiques *in vivo* (et *in vitro*) ont constitué la voie choisie pour rechercher les effets potentiels de l'exposition aux champs à fréquence industrielle. Des mesures du champ électrique non perturbé sont également requises par des documents qui fixent des limites pour l'exposition aux champs électriques [5], [29]. De ce fait, la caractérisation du champ électrique non perturbé a constitué le thème majeur de la présente norme.

NOTE – Il convient de souligner une exception notable décrite dans [51] et [28] qui exige que les champs électriques perturbés produits par des écrans de visualisation soient mesurés à l'aide de **capteurs de paroi**, placés au-dessus du plan du sol. L'utilisation de cette méthode se justifie par le fait que la sonde reliée à la terre, une plaque plate et circulaire, représente approximativement la surface d'un opérateur de terminal d'affichage vidéo relié à la terre. La relation entre la valeur du champ électrique perturbé qui est mesuré et les valeurs du champ électrique à la surface de l'opérateur est inconnue. Voir également objectif (i).

Il convient de noter que les champs électriques qui ont été étudiés par le passé sont principalement des champs électriques verticaux produits par des lignes d'alimentation et des équipements haute tension associés. Les champs électriques produits par de telles sources peuvent dépasser 10 kV/m [1] et sont bien plus grands que les champs électriques habituellement rencontrés dans des bâtiments résidentiels. Dans des bâtiments résidentiels, les valeurs des champs électriques peuvent aller de quelques centaines de volts par mètre (par exemple à proximité d'une couverture chauffante) à moins de quelques volts par mètre dans des endroits éloignés des appareils électriques [4].

On trouvera ci-après une liste d'objectifs de mesure et de méthodes de mesure permettant d'atteindre ces objectifs. Comme pour la caractérisation des champs magnétiques (voir article D.3), il convient de noter que cette liste n'est pas exhaustive, compte tenu de la variété des objectifs et des méthodes. Pour chaque objectif, la **bande passante** des instruments est choisie pour la ou les fréquences étudiées (voir objectif (g)).

Objectif (a): caractérisation des niveaux de champs électriques

Des limites ont été définies dans bon nombre de documents [5], [29] pour les niveaux de champs électriques admissibles en fonction de la fréquence et de l'orientation; ces limites exigent la détermination des niveaux de champs ayant l'amplitude la plus élevée, ainsi que la détermination de leur direction dans des zones spécifiées.

Méthode: Il est possible d'utiliser des **capteurs d'espace libre** et des **capteurs électro-optiques** pour effectuer des **mesures ponctuelles** du **champ électrique maximal** ou du **champ électrique résultant**. Il convient d'utiliser des **capteurs de paroi** pour effectuer des mesures sur le plan du sol ou sur des surfaces ayant le même potentiel que la terre. Il existe des recommandations pour mesurer le champ électrique essentiellement vertical à la fréquence industrielle, au niveau du sol au voisinage de lignes d'alimentation [22], [27]. Le champ électrique vertical est souvent mesuré parce que cette amplitude peut servir à calculer les effets de l'induction électrique sur des objets proches du plan du sol [9]. Contrairement aux **mesures ponctuelles** de champs magnétiques produits par des lignes d'alimentation, les valeurs mesurées ne varient pas de façon notable parce que les tensions restent pratiquement constantes (l'affaissement des conducteurs provoqué par l'échauffement dû aux courants de charge élevés peut engendrer des niveaux de champs plus élevés).

Le document [22] donne quelques recommandations pour mesurer les champs électriques à fréquence industrielle dans des endroits éloignés des lignes d'alimentation, lorsque la géométrie des champs est moins bien définie. Pour effectuer les mesures, il est également possible d'utiliser un montage similaire à celui utilisé pour déterminer les effets de proximité (voir figure B.2). Il est possible d'obtenir des estimations de la plage de niveaux de champs électriques en effectuant des **mesures ponctuelles**, après avoir mis sous tension puis hors tension tous les appareils et équipements électriques présents dans la zone étudiée [4].

Enhancement factors for humans and animals in vertical electric fields have also been reported by other investigators [11], [66]. The enhancement factors have been used for scaling the electric field across different animal species when planning exposures for *in vivo* biological studies. Characterization of the unperturbed electric field followed by appropriately scaled fields for *in vivo* (and *in vitro*) biological studies has been the pattern for investigating the possible effects of exposure to power frequency fields. Measurements of the unperturbed electric field are also required by documents that set limits on electric field exposure [5], [29]. Thus, characterization of the unperturbed electric field has been the primary focus of this standard.

NOTE – A notable exception is described in [51] and [28], which requires the measurement of perturbed electric fields from VDTs using ground-referenced electric field meters above the ground plane. The rationale for this approach is that the grounded probe, a flat circular plate, approximates the surface of a grounded VDT operator. The relationship between the perturbed electric field value that is measured and the electric field values at the surface of the operator is unknown (see also goal (i)).

It should be noted that the electric fields of past interest have been mainly vertical electric fields produced by power lines and related high-voltage equipment. The electric fields from such sources can be in excess of 10 kV/m [1] and are much larger than electric fields typically found in residences. In residences, the electric fields can range in value from a few hundred volts per metre (e.g. near an electric blanket) to less than a few volts per metre away from electrical appliances [4].

Below is a listing of measurement goals and possible methods of measurement for their accomplishment. As for characterizing magnetic fields (see clause D.3), the listing should not be considered as complete because there can be a large variety of goals and methods. For each goal the frequency **pass-band** of the instrumentation is chosen for the frequency or frequencies of interest (see goal (g)).

Goal (a): Characterization of electric field levels

Limits on permissible electric field levels as a function of frequency and direction have been indicated in a number of documents [5], [29] these limits require the determination of field levels with the greatest magnitude as well as their direction in specified areas.

Method: Free-body and **electro-optic meters** can be used to make **spot measurements** of the maximum or **resultant electric field**. Ground-referenced meters should be used for measurements on the ground plane or on surfaces at ground potential. Guidance exists for measuring the predominantly vertical power frequency electric field near ground level in the vicinity of power lines [22], [27]. The vertical electric field is often measured because this quantity can be used to calculate induction effects in objects close to ground level [9]. Unlike **spot measurements** of magnetic fields from power lines, the measured values will not change greatly because the voltages remain nearly constant (sagging of the conductors because of heating due to large current loads can lead to greater field levels).

Some guidance for measuring power frequency electric fields away from power lines where the field geometry is less well defined is given in [22]. An arrangement similar to that used for determining proximity effects (see figure B.2) may also be used for performing measurements. Estimates of the range of electric field levels can be obtained by performing **spot measurements** with all electrical appliances and equipment turned on and off in the area of interest [4].

Objectif (b): caractérisation des variations spatiales

La distribution spatiale des champs électriques loin des lignes d'alimentation est habituellement inconnue. Les champs électriques alternatifs seront non uniformes dans la plupart des environnements parce que, dans certains cas, les dépendances spatiales vis-à-vis des sources de champs (conducteurs sous tension) sont identiques à celles des champs magnétiques.

Méthode: Les mesures de variations spatiales nécessitent l'enregistrement des composantes du champ électrique en fonction de la position des coordonnées. Il existe des normes prescrivant la manière d'effectuer de telles mesures à proximité de lignes d'alimentation [22], [27] et des écrans de visualisation [28], [51]. Bien que de telles mesures puissent être effectuées à l'aide de **dosimètres**, il existe des instruments utilisés conjointement aux «roues de mesure» pour caractériser les distributions spatiales des champs électriques dans des environnements où les obstacles physiques ne gênent pas le mouvement de la roue. Au fur et à mesure que la roue tourne, elle active périodiquement un **capteur d'espace libre** qui détecte et enregistre la forme d'onde des composantes du champ électrique, avant de la transmettre, par l'intermédiaire d'un câble à fibre optique, à une partie du circuit détecteur pour être stocké en mémoire. Un logiciel, fourni avec de tels instruments, permet de produire des tracés de profils de champs électriques, des contours d'équi-champs, des analyses statistiques des niveaux de champs, etc. De telles données ne permettent pas de déterminer les variations temporelles à long terme des profils de champs sans répéter les mesures. Des variations du champ peuvent se produire si la sonde passe devant des surfaces chargées électriquement, par exemple des vêtements en matières plastiques ou synthétiques.

Objectif (c): caractérisation des variations temporelles

En général, les variations temporelles des champs électriques ne devraient pas être aussi notables que les variations temporelles des champs magnétiques. Les champs électriques sont produits par des conducteurs sous tension. Le champ électrique en un point est la somme vectorielle des contributions de tous les conducteurs sous tension au voisinage de l'endroit où sont effectuées les mesures. Les effets de blindage dus aux matériaux de construction, qui peuvent dépendre des conditions atmosphériques, par exemple des structures humides par temps de pluie, peuvent contribuer à la variabilité. Des variations à court terme se produisent en cas de déplacement d'objets conducteurs (par exemple automobiles et camions) passant devant l'emplacement de mesure.

Méthode: Il existe des **capteurs d'espace libre** pour enregistrer périodiquement le champ électrique en un point de l'espace, en vue d'analyses ultérieures pour déterminer les variations temporelles (voir objectif (b)). Il est possible d'utiliser des **capteurs de paroi** munis de dispositifs d'enregistrement disponibles dans le commerce pour enregistrer le champ électrique sur des surfaces reliées à la terre en vue d'analyses ultérieures. Il est souhaitable que la **bande passante** des instruments convienne pour la ou les fréquences étudiées (voir objectif (g)).

Objectif (d): caractérisation du champ électrique moyen pondéré dans le temps

Objectif (e): caractérisation de l'intermittence du champ électrique

Objectif (f): caractérisation des niveaux de champs dépassant une valeur spécifiée

Méthode: Ces paramètres peuvent être déterminés, pendant des intervalles de temps déterminés, par des analyses des données recueillies au moyen de capteurs de champ électrique munis de dispositifs d'enregistrement (voir objectifs (b) et (c)).

Objectif (g): caractérisation du contenu fréquentiel d'un champ électrique

En raison des limites définies, en fonction de la fréquence, pour les expositions aux champs électriques [5], [29], la caractérisation du contenu fréquentiel peut constituer un objectif important.

Goal (b): characterization of spatial variations

The spatial distribution of electric fields away from power lines is typically unknown. Alternating electric fields will be non-uniform in most environments because the spatial dependencies from the field sources (energized conductors) are the same in some cases as those for magnetic fields.

Method: Spatial variation measurements require the recording of the electric field components as a function of coordinate position. Standards exist for carrying out such measurements near power lines [22], [27] and VDTs [28], [51]. While such measurements can be made with **survey meters**, instrumentation used in conjunction with "measurement wheels" is available for characterizing spatial distributions of electric fields in environments where physical obstructions do not hinder the movement of the wheel. As the wheel rotates, it periodically triggers a **free-body electric field meter** which captures and transmits the waveform of the electric field (component) via a fibre-optic cable to a portion of the detector circuit for storage. Software provided with such instrumentation enables the generation of plots of electric field strength profiles, equifield contours, statistical analyses of the field levels, etc. Such data will not capture the long-term temporal variations of the field profiles without repeated measurements. Variations of the field may occur if the probe is moved past electrically charged surfaces, e.g. plastics and synthetic clothing.

Goal (c): characterization of temporal variations

The temporal variations of electric fields, in general, should not be as great as for magnetic fields. Electric fields are produced by conductors that are electrically energized. The electric field at a point will be the vector sum of contributions from all energized conductors in the vicinity of the measurement location. Shielding effects provided by building materials, which can depend on weather conditions (e.g. wet structures during rainy weather), can contribute to the variability. Short-term variations will occur if there is movement of conducting objects (e.g. automobiles and trucks) past the measurement location.

Method: Free-body instrumentation is available that periodically records the electric field at a point in space and which can be used in later analyses to determine the temporal variations (see goal (b)). **Ground reference meters** can be used with commercially available data loggers to record the electric field on grounded surfaces for later analyses. The frequency **pass-band** of the instrumentation should be adequate for the frequency or frequencies of interest (see goal (g)).

Goal (d): characterization of TWA electric field

Goal (e): characterization of electric field intermittency

Goal (f): characterization of field levels exceeding a specified value

Method: These parameters can be determined for time intervals of interest by analysis of data collected with electric field meters which have recording capabilities (see goals (b) and (c)).

Goal (g): characterization of the frequency content in electric field

Because limits for exposure to electric fields have been set as a function of frequency [5], [29], characterization of frequency content can be an important goal.

Méthode: Il existe dans le commerce des **capteurs d'espace libre** qui sont capables d'enregistrer périodiquement la forme d'onde du champ électrique; ces **capteurs d'espace libre** sont munis d'un programme logiciel permettant de déterminer le contenu fréquentiel à partir des données enregistrées. Il est possible d'utiliser les signaux transmis par des **capteurs de paroi** associés aux analyseurs de spectres pour déterminer le contenu fréquentiel de champs caractérisés sur des surfaces reliées à la terre. Des **capteurs d'espace libre** tri-axiaux capables d'être accordés sur certaines fréquences sont en cours de développement. Il est souhaitable que la **bande passante** des instruments convienne pour la ou les fréquences étudiées.

Objectif (h): caractérisation de la polarisation du champ électrique

Une caractérisation complète du champ électrique exige que la polarisation du champ électrique soit déterminée pour une fréquence donnée.

Méthode: Il est possible d'utiliser des **capteurs d'espace libre** et des **capteurs électro-optiques** mono-axiaux pour mesurer les valeurs efficaces du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse du champ électrique, afin de déterminer sa polarisation en un point de l'espace. Des **capteurs d'espace libre** tri-axiaux capables d'indiquer la polarisation sont également en cours de développement. Comme précédemment mentionné, cette procédure suppose qu'une seule composante fréquentielle dans le champ est mesurée. S'il y a d'autres fréquences dans le champ, le vecteur électrique tournant ne trace plus une simple ellipse. Des recommandations pour déterminer la polarisation près des lignes d'alimentation sont données dans les documents [22], [27].

Objectif (i): caractérisation de l'exposition des êtres humains aux champs électriques

Méthode: Il convient de faire une distinction entre la caractérisation d'un ou de plusieurs paramètres du champ électrique (par exemple les objectifs (a) à (h)) et l'exposition à ces paramètres. Comme précédemment mentionné, étant donné qu'il est difficile de se procurer des posemètres et que l'interprétation des données enregistrées peut être complexe, la détermination directe de l'historique de l'exposition aux champs électriques peut s'avérer difficile. Cela suggère que le champ électrique non perturbé soit caractérisé par un ou plusieurs paramètres concernés, mentionnés dans les objectifs (a) à (h). Il est possible d'obtenir des estimations de l'exposition à un ou plusieurs des paramètres dans une zone spécifiée à partir d'une combinaison entre des mesures spatiales et temporelles et d'informations qui décrivent les activités humaines dans la zone. Dans une étude, cette méthode a permis de déterminer des «facteurs d'activité» qui peuvent être utilisés comme partie intégrante d'un processus pour estimer l'exposition à long terme des champs électriques dans un environnement agricole [12]. Il est possible d'estimer l'amplitude du champ à la surface du corps en utilisant des facteurs d'augmentation précédemment déterminés pour la géométrie du champ étudié.

Pour des géométries de champs électriques fixes, durant lesquelles les déplacements d'êtres humains sont limités, il est possible de déterminer le champ électrique *perturbé* à la surface du corps en utilisant un mannequin portant un vêtement externe conducteur et en plaçant des sondes plates ou des capteurs, tous deux isolés électriquement à la surface du mannequin au niveau des emplacements étudiés [11]. Le potentiel de référence du mannequin et les circuits détecteurs des sondes restent inchangés et il est possible de les faire varier afin de se rapprocher des conditions prédominantes dans des environnements réels. L'enregistrement du signal de sortie transmis par le détecteur au moyen d'un dispositif d'enregistrement de données permet de disposer d'informations sur la variation temporelle du **champ perturbé**.

E.4 Exemple de protocole de mesure de champs électriques

L'exemple décrit ci-après est un exemple de protocole de mesure pour déterminer l'exposition des êtres humains aux champs électriques dans les postes d'alimentation électrique. Les objectifs des mesures et les méthodes utilisées pour atteindre ces objectifs sont clairement indiqués en tant que parties intégrantes du processus d'élaboration des protocoles.

Method: Commercially available free-body instrumentation, which can periodically record the waveform of the electric field, has software that allows the determination of the frequency content from the recorded data. Signals from ground-referenced electric field meters can be used with spectrum analysers to determine the frequency content of fields characterized on grounded surfaces. Three-axis **free-body meters** which can be tuned to certain frequencies are under development. The frequency **pass-band** of the instrumentation should be adequate for the frequency or frequencies of interest.

Goal (h): characterization of electric field polarization

A full characterization of the electric field requires a determination of its polarization for a given frequency.

Method: Single-axis **free-body** and **electro-optic field meters** can be used to measure the r.m.s. values of the semi-major and semi-minor axes of the electric field ellipse to determine its polarization at a point in space. Three-axis **free-body meters** which can indicate the polarization are also under development. As noted earlier, this procedure assumes that only a single frequency component of the field is being measured. With the presence of other frequencies in the field, the rotating electric vector no longer traces a simple ellipse. Guidance for determining polarization near power lines is given in [22], [27].

Goal (i): characterizing human electric field exposure

Method: A distinction should be made between characterizing one or more electric field parameters (e.g. goals (a) through (h)), and exposure to those parameters. As previously discussed, because electric field exposure meters are not readily available and interpretation of the recorded data can be complicated, a direct determination of the exposure history may be difficult. This suggests that the unperturbed electric field be characterized in terms of one or more parameters of interest considered in goals (a) through (h). Estimates of exposure to one or more of the parameters in a specified area can be made from a combination of spatial and temporal measurements and information which describes patterns of human activity in the area. In one study this approach has led to the determination of "activity factors" which can be used as part of a process to estimate long-term electric field exposure in an agricultural setting [12]. The field magnitude at the surface of the body can be estimated using previously determined enhancement factors for the field geometry under consideration.

For fixed electric field geometries, during which there is limited human motion, the *perturbed* electric field strength at the surface of the body can be determined using a manikin with an outer conductive coating and electrically isolated flat probes or sensors affixed to the surface of the manikin at locations of interest [11]. The reference potential of the manikin and detector circuits for the probes are kept the same and can be varied to approximately match the prevailing conditions in actual environments. Recording the output signal from the detector with a data logger will provide information on the temporal variation of the **perturbed field**.

E.4 Example of an electric field measurement protocol

An example of a measurement protocol for determining human exposure to electric fields in substations is described below. As part of the process of developing the protocols, the measurement goals and methods for achieving them are clearly indicated. It should be noted that the measurement procedures described below may differ significantly from those used in

Il convient de noter qu'il peut y avoir des différences considérables entre les procédures de mesure décrites ci-après et celles utilisées dans d'autres environnements pour atteindre d'autres objectifs. Par exemple, on peut s'intéresser à différents critères d'exposition et à divers emplacements de mesure relatifs au corps humain, ou alors des fréquences autres que la fréquence industrielle peuvent avoir de l'importance. Toutefois, l'exemple illustre les éléments essentiels d'un protocole de mesure destiné à caractériser l'exposition des êtres humains, c'est-à-dire une indication claire des objectifs et des exigences applicables à chaque étape du protocole de mesure. Des objectifs et des méthodes prévus pour caractériser des champs électriques sont discutés à l'article E.3.

NOTE – On sait qu'il existe d'autres méthodes permettant d'atteindre les mêmes objectifs.

Objectif Les objectifs des mesures consistent à déterminer si des niveaux de champs électriques alternatifs plus élevés que les niveaux de champs électriques alternatifs de référence [5] sont subis par le personnel travaillant dans un poste d'alimentation électrique, et si la durée d'exposition dépasse les limites indiquées dans le projet de norme ENV 50166-1 du CENELEC [5]. Les paramètres de champ à caractériser sont la composante verticale et la plus grande composante horizontale du champ électrique non perturbé, en fonction du temps. Les niveaux de champs électriques de référence E_{RL} spécifiés par le CENELEC pour des champs parallèles au corps, sont respectivement de 30 kV/m et de 25 kV/m pour des champs à 50 Hz et 60 Hz. Les niveaux de champs de référence peuvent être dépassés si le champ électrique est majoritairement perpendiculaire au corps, et si certaines exigences concernant le courant induit sont satisfaites [5].

La conformité au projet de norme du CENELEC [5] exige également la caractérisation des niveaux d'induction magnétique en fonction de la fréquence et la vérification des équations (17) et (18), comme mentionné à l'article D.4.

On suppose les conditions suivantes: les tâches journalières du personnel exigent qu'il se déplace occasionnellement dans le poste au niveau du sol, et qu'il travaille également en position assise; les emplacements des sources de champs électriques sont généralement connues; et la température et l'humidité relative sont comprises dans les limites des plages indiquées en 6.1.4. On suppose également que le taux d'harmoniques est inférieur à 5 % et que sa contribution à la valeur efficace du champ électrique est donc négligeable.

Méthode Il convient d'effectuer d'abord une première enquête concernant les **mesures ponctuelles** de la distribution spatiale du **champ électrique résultant**, afin d'identifier les endroits où les niveaux des champs sont les plus élevés. Il convient d'effectuer les mesures à l'aide de **capteurs d'espace libre** ou de **capteurs électro-optiques** mono-axiaux ou tri-axiaux (voir article E.1 pour la description des instruments) pour lesquels

- il est souhaitable que la **bande passante** contienne la fréquence industrielle;
- il est souhaitable que la plage d'amplitudes des instruments aille au moins de quelques volts par mètre à 30 kV/m;
- il est nécessaire que l'incertitude des instruments soit inférieure à ± 10 % (**facteur de couverture 2**);
- il est souhaitable que la sonde de mesure du champ électrique soit placée à une hauteur de 1 m au-dessus du sol ou du plancher du bâtiment;
- si la distance entre la sonde et les surfaces conductrices est inférieure à deux fois le diamètre de la sonde, il convient de tenir compte des **incertitudes de mesure** dues aux champs-images produits par les effets de proximité (voir B.2.3);
- il convient de rendre négligeable les effets dus à la proximité de l'expérimentateur (voir B.2.1);
- pour les emplacements où le **champ électrique résultant** est égal ou supérieur au niveau de référence, il convient de déterminer la composante verticale ainsi que la plus grande

other environments with other goals. For example, different exposure criteria and measurement locations relative to the human body may be of interest, or frequencies other than the power frequency may be important. The example, however, does illustrate the essential elements of a measurement protocol for characterizing human exposure, i.e. a clear indication of the goals and the step-by-step requirements of the measurement protocol. Additional discussion of goals and methods intended for characterizing electric fields is provided in E.3.

NOTE – It is recognized that there are other methods for accomplishing the same measurement goals.

Goal The goals of the measurements are to determine whether larger than alternating electric field reference levels [5] are experienced by personnel working in a substation, and whether the duration of exposure exceeds time limits given in the CENELEC prestandard ENV 50166-1 [5]. The field parameters to be characterized are the vertical and largest horizontal unperturbed electric field components as a function of time. The CENELEC reference electric field strength levels E_{RL} , for fields that are parallel to the body, are 30 kV/m and 25 kV/m for 50 Hz and 60 Hz fields, respectively. The reference field levels may be exceeded if the electric field is predominantly perpendicular to the body, and if certain requirements on induced current are met [5].

Compliance with the CENELEC prestandard [5] also requires characterization of the magnetic flux density levels as a function of frequency and satisfaction of equations (17) and (18), as discussed in D.4.

The following conditions are assumed: the daily duties of the personnel require them to move about the substation occasionally at ground level as well as being seated; the locations of the electric field sources are generally known; and the temperature and relative humidity are within the ranges specified in 6.1.4. It is further assumed that harmonic content is less than 5 % and thus contributes negligibly to the r.m.s. value of the electric field.

Method Initially, a preliminary survey of **spot measurements** of the **resultant electric field** spatial distribution should be performed with the aim of identifying the locations with high field levels. The measurements should be made using single-axis or three-axis **free-body** or **electro-optic field meters** (see clause E.1 for description of instrumentation) for which

- the **pass-band** should include the power frequency;
- the magnitude range of the instrumentation should extend at least from a few volts per metre to 30 kV/m;
- the instrumental uncertainty shall be less than ± 10 % (**coverage factor 2**);
- the electric field probe should be located 1 m above the ground or building floor;
- if the probe is less than two probe diameters away from conducting surfaces, consideration should be given to **measurement uncertainties** which are due to image fields because of proximity effects (see B.2.3);
- proximity effects of the observer should be made negligible (see B.2.1);
- for those locations where the **resultant electric field** equals or exceeds the reference level, the vertical and largest horizontal electric field components should be determined.

composante horizontale du champ électrique. La conformité aux limites d'exposition aux champs électriques imposées par le CENELEC [5] est déterminée en vérifiant si le champ électrique vertical dépasse le niveau de référence E_{RL} spécifié par le CENELEC [5];

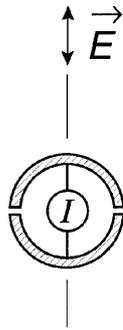
NOTE – Ce protocole suppose, dans la plupart des cas, que le champ électrique vertical est parallèle au corps. Comme mentionné plus haut, dans certaines conditions, il est permis que des champs perpendiculaires au corps dépassent la valeur E_{RL} .

- aux emplacements où les niveaux d'induction magnétique sont significatifs, il convient de considérer simultanément les valeurs enregistrées du champ électrique et les valeurs du champ magnétique (en fonction de la fréquence – voir 5.5.2) pour déterminer la conformité au critère donné par l'équation (18);
- aux emplacements où le **champ électrique résultant** est supérieur à 10 kV/m, la limite de la durée d'exposition imposée par le CENELEC (durant une période de travail de 8 h) est déterminée à partir des valeurs mesurées du champ et de la relation $t \leq 80/E_R$, où E_R est exprimé en kilovolts par mètre et le temps t est exprimé en heures;
- il convient de fournir des croquis qui font partie intégrante de la documentation relative aux résultats de mesure; ces croquis doivent représenter les zones où les mesures sont effectuées. Il est souhaitable que les emplacements des points de mesure soient clairement indiqués, soit avec un «x» ou «•». Il convient également d'indiquer le fabricant de l'instrument, le modèle de l'instrument, son numéro de série, l'**incertitude de mesure totale (facteur de couverture 2)**, la date du dernier étalonnage ou de la dernière vérification de l'étalonnage, et la ou les personnes qui ont effectué les mesures.

Compliance with the CENELEC [5] restriction for electric field exposure is determined by noting whether the vertical electric field exceeds the CENELEC [5] reference level E_{RL} ;

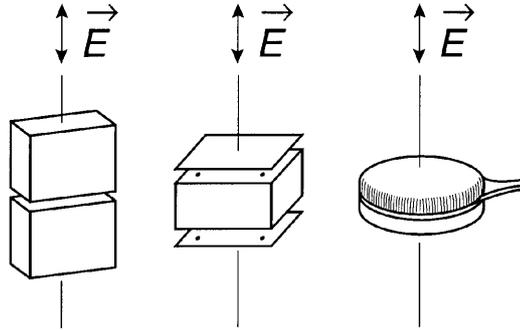
NOTE – This protocol assumes that in most instances the vertical electric field is parallel to the body. As noted above, under certain conditions, fields perpendicular to the body are permitted to exceed E_{RL} .

- for those locations where there are significant magnetic flux density levels, the recorded electric field values should be considered with the magnetic field values (as a function of frequency – see 5.5.2) to determine compliance with the criterion given by equation (18);
- for those locations where the **resultant electric field** is more than 10 kV/m, the CENELEC [5] time limit for exposure (during an 8 h work period) is determined from the measured field values and the relation $t \leq 80/E_R$, where E_R is in units of kilovolts per metre and the time t is in units of hours;
- as part of the documentation for the measurement results, sketches should be provided of the areas where measurements are performed. The locations of the measurement points should be clearly indicated, e.g. with an "x" or "•". The instrument manufacturer, instrument model, serial number, total **measurement uncertainty (coverage factor of 2)**, date of last calibration or calibration verification, and the person or persons performing the measurements should be indicated.



IEC 1 233/98

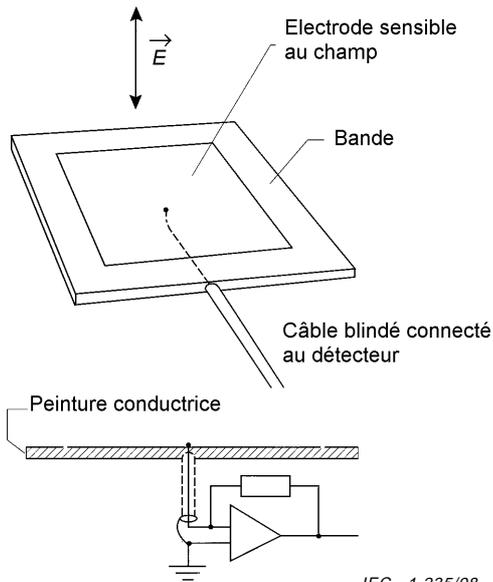
Figure E.1a – Capteur de champ électrique d'espace libre sphérique



IEC 1 234/98

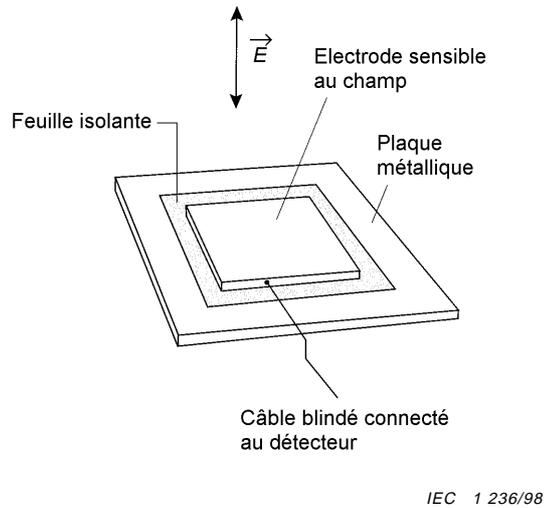
Figure E.1b – Capteurs de champ électrique mono-axiaux, disponibles dans le commerce

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



IEC 1 235/98

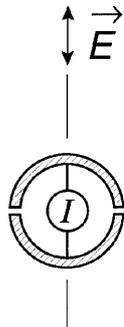
Figure E.2a – Sonde plate réalisée à l'aide d'un circuit imprimé double face



IEC 1 236/98

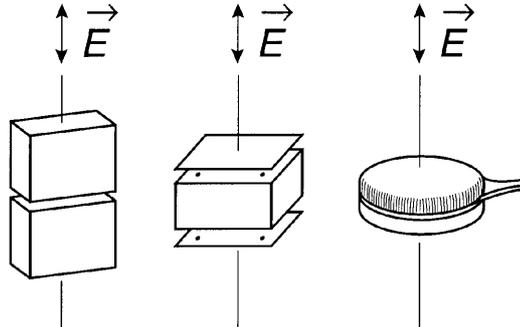
Figure E.2b – Sonde plate constituée de deux plaques parallèles séparées par une feuille isolante

Figure E.2 – Modèles de sondes planes utilisées avec des capteurs de paroi



IEC 1 233/98

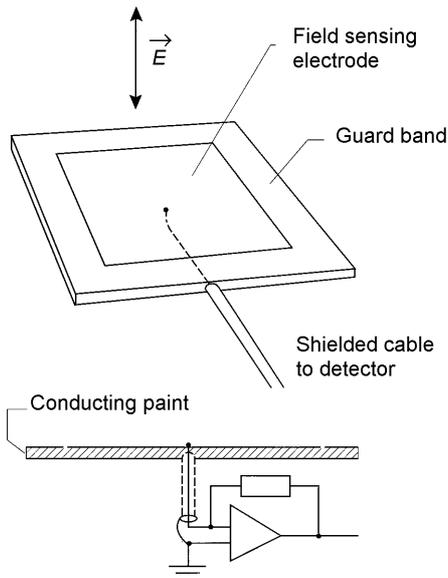
Figure E.1a – Spherical free-body electric field meter



IEC 1 234/98

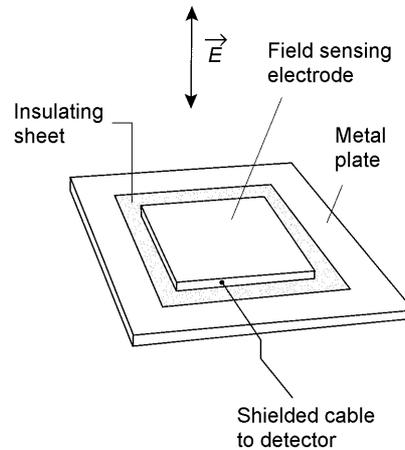
Figure E.1b – Commercial single-axis electric field meters

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



IEC 1 235/98

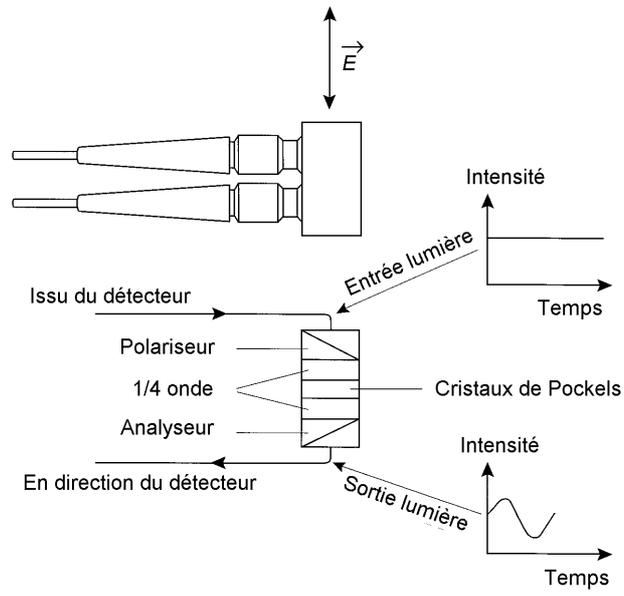
Figure E.2a – Flat probe made with double-clad printed circuit board



IEC 1 236/98

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

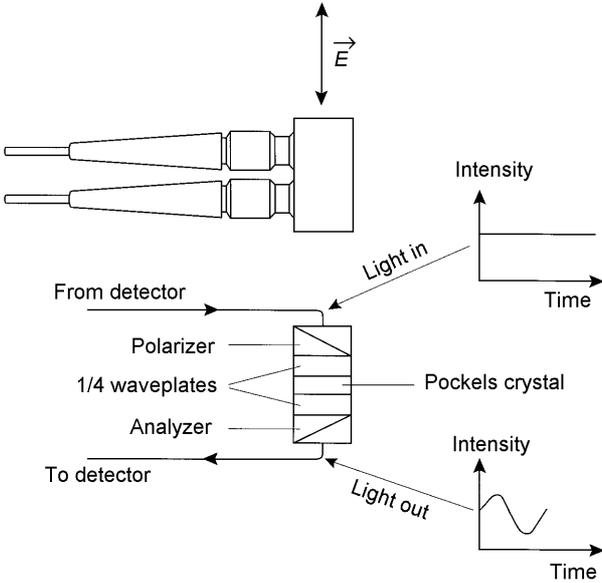
Figure E.2 – Designs for flat plate probes used with ground-referenced electric field meters



IEC 1 237/98

L'amplitude de la modulation de la lumière lorsqu'elle traverse le cristal de Pockels et les autres éléments optiques fournit une mesure du champ électrique E .

Figure E.3 – Sonde pour capteur de champ électriques à effet Pockels



IEC 1 237/98

The amplitude of the modulation as light passes through the Pockels crystal and other optical elements provides a measure of the electric field E .

Figure E.3 – Probe for Pockels-effect electric field meter

Annexe F (informative)

Instruments de mesure de champs magnétiques statiques

Le but de la présente annexe est d'indiquer qu'il est possible d'effectuer des mesures précises de champs magnétiques statiques à l'aide d'une grande variété d'instruments disponibles dans le commerce, utilisant de nombreuses techniques de mesure [37]. Par exemple, les **magnétomètres à noyau saturable**, les capteurs de résonance magnétique nucléaire (RMN), les capteurs à effet Hall, et les magnétomètres à dispositifs quantiques supraconducteurs (SQUID) figurent parmi la grande variété d'instruments disponibles.

Il est possible d'utiliser des **magnétomètres à noyau saturable** et des capteurs à effet Hall pour caractériser la plage de champs statiques prévus pour les environnements de mesure considérés dans la norme d'accompagnement. La sensibilité des **magnétomètres à noyau saturable** convient pour mesurer des champs dans la plage allant de 0,1 μT (et moins) à 0,01 T, et les capteurs à effet Hall peuvent mesurer facilement des niveaux allant de 100 μT à 10 T [37].

Il existe dans le commerce des aimants étalons pour effectuer des étalonnages à des niveaux de champs relativement élevés, par exemple 0,005 T à 2 T. Le système de **bobines** mentionné à l'article A.1 peut servir à produire des champs statiques connus avec des valeurs plus faibles, si des courants continus sont utilisés pour exciter les **bobines**. Cependant, il est nécessaire de tenir compte de l'influence du champ statique parasite lorsque son amplitude est significative par rapport à celle du champ étalon. Il existe des aimants étalons munis d'un blindage de protection pour éviter les perturbations générées par des champs magnétiques externes. Le champ statique parasite peut également être supprimé en utilisant un ensemble de **bobines** auxiliaires. Le fait d'orienter l'axe du système de **bobines** d'étalonnage dans la direction Est-Ouest permet de réduire l'influence du champ géomagnétique.

Il convient de noter que la grande précision des capteurs RMN autorise leur utilisation en tant qu'instrument étalon.

Annex F (informative)

Static magnetic field-measuring instrumentation

The purpose of this annex is to note that measurements of static magnetic fields can be performed accurately with a range of commercially available instrumentation employing a variety of measurement techniques [37]. For example, **fluxgate magnetometers**, nuclear magnetic resonance (NMR) field meters, Hall effect field meters, and the superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers are a few of the instruments available.

Fluxgate magnetometers and Hall-effect field meters can be used to characterize the range of static fields anticipated for the measurement environments considered in the accompanying standard. **Fluxgate magnetometers** have adequate sensitivity to measure fields in the range of 0,1 μT (and lower) to 0,01 T, and Hall-effect meters can readily measure levels between 100 μT and 10 T [37].

Standard reference magnets are commercially available for calibration purposes at relatively high field levels, e.g. 0,005 T to 2 T. The coil systems referred to in A.1 can be used to generate known static fields with lower values if direct currents are used to energize the coils. However, the influence of the background static field should be considered when significant in magnitude compared to the calibration field. Standard reference magnets are available with magnetic shields to prevent perturbations from external magnetic fields. The background static field may also be cancelled using a set of auxiliary coils. Orienting the axis of the calibration coil system in the East-West direction reduces the influence of the geomagnetic field.

It is noteworthy that the very high accuracy of NMR magnetic field meters enables them to be used as a reference standard.

Annexe G (informative)

Unités

G.1 Unités

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

Pour d'autres unités, voir ISO 1000:1992 [30].

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

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

G.3 Constantes physiques utiles

Constante de perméabilité μ_0 :	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Constante de permittivité ϵ_0 :	$8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m

Annex G (informative)

Units

G.1 Units

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

For additional units, see ISO 1000:1992 [30].

G.2 SI units and SI derived units

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

G.3 Useful physical constants

Permeability constant μ_0 :	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Permittivity constant ϵ_0 :	$8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m

.....

Annexe H (informative)

Bibliographie

- [1] ARMANINI, D., CONTI, R., MANTINI, A., et NICOLINI, P., *Measurements of power frequency electric and magnetic fields around different industrial and household sources*, CIGRE Paper 36-107 (190).
- [2] BEIRSDORFER, P. et CLOTHIAUX, E.J., *High-Frequency Magnetic Measurements Using Small Inductive Probes*, American Journal of Physics 51, pp. 1031-1036 (1983).
- [3] BOTTAUSCIO, O., CROTTI, G., D'EMILIO, S., FARINA, G., et MANTINI, A., *Generation of Reference Electric and Magnetic Fields for Calibration of Power-Frequency Field Meters*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 42, pp. 547-552 (1993).
- [4] CAOLA, Jr., R.J., DENO, D.W., et DYMEK, V.S.W., *Measurement of electric and magnetic fields in and around homes near a 500 kV transmission line*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-102, pp. 3338-3347 (1983).
- [5] CENELEC, *Projet de norme européenne ENV 50166-1, Exposition humaine aux champs électromagnétiques basses fréquences (0 Hz à 10 kHz)*, (1995).
- [6] CHARTIER, V.L., BRACKEN, T.D., et CAPON, S.A., *BPA study of occupational exposure to 60-Hz electric fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-104, pp. 733-744 (1985).
- [7] COOK, M.C., GRAHAM, C., COHEN, H.D., et GERKOVICH, M.M., *A replication study of human exposure to 60-Hz Fields*, Bioelectromagnetics 13, pp. 261-285 (1992).
- [8] COOKE, C.M., *Proximity Effect of a Conducting Plane in Electro-Optic Field Probe Measurements*, 1983 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Buck Hill Falls, PA, (1983).
- [9] DENO, D.W., *Electrostatic Effect Induction Formulae*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-94, pp. 1524-1536 (1975).
- [10] DENO, D.W., *Transmission Line Fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-95, pp. 1600-1611 (1976).
- [11] DENO, D.W., *Currents induced in the human body by high-voltage transmission line electric field-measurement and calculation of distribution and dose*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-96, pp. 1517-1527 (1977).
- [12] DENO, D.W. et SILVA, M., *Method for evaluating human exposure to 60-Hz electric fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-103, pp. 1699-1706 (1984).
- [13] DIETRICH, F.M., FEERO, W.E., et JACOBS, W.L., *Comparison of magnetic and electric fields of conventional and advanced electrified transportation systems*, U.S. Dept. of Transportation Report, DOT/FRA/ORD-93/07 (1993).
- [14] DIPLACIDO, J., SHIH, C.H., et WARE, B.J., *Analysis of the Proximity Effects in Electric Field Measurements*, IEEE Trans. Power Appar. and Systems PAS-97, pp. 2167-2177 (1978).

Annex H (informative)

Bibliography

- [1] ARMANINI, D., CONTI, R., MANTINI, A., and NICOLINI, P., *Measurements of power frequency electric and magnetic fields around different industrial and household sources*, CIGRE Paper 36-107 (190).
- [2] BEIRSDORFER, P. and CLOTHIAUX, E.J., *High-Frequency Magnetic Measurements Using Small Inductive Probes*, American Journal of Physics 51, pp. 1031-1036 (1983).
- [3] BOTTAUSCIO, O., CROTTI, G., D'EMILIO, S., FARINA, G., and MANTINI, A., *Generation of Reference Electric and Magnetic Fields for Calibration of Power-Frequency Field Meters*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 42, pp. 547-552 (1993).
- [4] CAOLA, JR., R.J., DENO, D.W., and DYMEK, V.S.W., *Measurement of electric and magnetic fields in and around homes near a 500 kV transmission line*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-102, pp. 3338-3347 (1983).
- [5] CENELEC, European Prestandard ENV 50166-1, *Human exposure to electromagnetic fields, low frequencies (0 Hz to 10 kHz)*, (1995).
- [6] CHARTIER, V.L., BRACKEN, T.D., and CAPON, S.A., *BPA study of occupational exposure to 60-Hz electric fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-104, pp. 733-744 (1985).
- [7] COOK, M.C., GRAHAM, C., COHEN, H.D., and GERKOVICH, M.M., *A replication study of human exposure to 60-Hz Fields*, Bioelectromagnetics 13, pp. 261-285 (1992).
- [8] COOKE, C.M., *Proximity Effect of a Conducting Plane in Electro-Optic Field Probe Measurements*, 1983 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Buck Hill Falls, PA, (1983).
- [9] DENO, D.W., *Electrostatic Effect Induction Formulae*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-94, pp. 1524-1536 (1975).
- [10] DENO, D.W., *Transmission Line Fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-95, pp. 1600-1611 (1976).
- [11] DENO, D.W., *Currents induced in the human body by high-voltage transmission line electric field-measurement and calculation of distribution and dose*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-96, pp. 1517-1527 (1977).
- [12] DENO, D.W. and SILVA, M., *Method for evaluating human exposure to 60-Hz electric fields*, IEEE Trans. Power Appar. Systems PAS-103, pp. 1699-1706 (1984).
- [13] DIETRICH, F.M., FEERO, W.E., and JACOBS, W.L., *Comparison of magnetic and electric fields of conventional and advanced electrified transportation systems*, U.S. Dept. of Transportation Report, DOT/FRA/ORD-93/07 (1993).
- [14] DIPLACIDO, J., SHIH, C.H., and WARE, B.J., *Analysis of the Proximity Effects in Electric Field Measurements*, IEEE Trans. Power Appar. and Systems PAS-97, pp. 2167-2177 (1978).

- [15] FEYCHTING, M. et AHLBOM, A., *Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines*, Am. J. Epidemiol. 138, pp. 467-481 (1993).
- [16] FIRESTER, A.H., *Design of Square Helmholtz Coil Systems*, Review of Scientific Instruments 40, 1468-1470 (1969).
- [17] FRIX, W.M., KARADY, G.G., et VENETZ, B.A., *Comparison of Calibration Systems for Magnetic Field Measurement Equipment*, IEEE Transactions on Power Delivery 9, pp. 100-109 (1994).
- [18] FULCOMER, P.M., *NBS Ambient Magnetic Field Meter for Measurement and Analysis of Low-Level Power Frequency Magnetic Fields in Air*, National Institute of Standard and Technology Report NBSIR 86-3330 (1985).
- [19] GOCKENBACH, E., GANZMANN, P., et BROGLI. E., *Some Applications of an Electric Field Sensor in the High-Voltage Technique*, Paper 40.06, Sixth International Symposium on High-Voltage Engineering, New Orleans, LA, (1989).
- [20] HALLIDAY, D. et RESNICK, R., *Physics, Parts I and II*, New York: Wiley & Sons, pp. 861-862 (1966).
- [21] HAMASAKI, H., GOTOH, H., KATOH, M., et TAKEUCHI, S., *OPSEF: An Optical Sensor for Measurement of High Electric Field Intensity*, Electronics Letters 16, pp. 406-407 (1980).
- [22] CEI 60833, *Mesure des champs électriques à fréquences industrielles*, (1987).
- [23] CEI 61000-2-5, *Compatibilité électromagnétique (EMC) – Partie 2: Environnement – Section 5: Classification des environnements électromagnétiques*. Publication fondamentale en CEM (1995).
- [24] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *An Evaluation of Instrumentation Used to Measure AC Power System Magnetic Fields*, IEEE Transactions on Power Delivery 6, pp. 373-383 (1991).
- [25] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *Measurement of Power Frequency Magnetic Fields Away from Power Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery 6, pp. 901-911 (1991).
- [26] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *A Protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields*, IEEE Transactions on Power Delivery 8, pp. 386-1394 (1993); IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *Correction to A Protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields*, Ibid 9, p. 606 (1994).
- [27] IEEE Std 644-1994 (Revision of IEEE Std 644-1987), *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines* (1994).
- [28] IEEE Std 1140-1994, *IEEE Standard Procedures for the Measurement of Electric and Magnetic Fields from Video Display Terminals (VDTs) from 5 Hz to 400 kHz* (1994).
- [29] IRPA/INIRC, *Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields*, Health Physics 58, pp. 113-122 (1990).

- [15] FEYCHTING, M. and AHLBOM, A., *Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines*, Am. J. Epidemiol. 138, pp. 467-481 (1993).
- [16] FIRESTER, A.H., *Design of Square Helmholtz Coil Systems*, Review of Scientific Instruments 40, 1468-1470 (1969).
- [17] FRIX, W.M., KARADY, G.G., and VENETZ, B.A., *Comparison of Calibration Systems for Magnetic Field Measurement Equipment*, IEEE Transactions on Power Delivery 9, pp. 100-109 (1994).
- [18] FULCOMER, P.M., *NBS Ambient Magnetic Field Meter for Measurement and Analysis of Low-Level Power Frequency Magnetic Fields in Air*, National Institute of Standard and Technology Report NBSIR 86-3330 (1985).
- [19] GOCKENBACH, E., GANZMANN, P., and BROGLI, E., *Some Applications of an Electric Field Sensor in the High-Voltage Technique*, Paper 40.06, Sixth International Symposium on High-Voltage Engineering, New Orleans, LA, (1989).
- [20] HALLIDAY, D. and RESNICK, R., *Physics, Parts I and II*, New York: Wiley & Sons, pp. 861-862 (1966).
- [21] HAMASACKI, H., GOTOH, H., KATOH, M., and TAKEUCHI, S., *OPSEF: An Optical Sensor for Measurement of High Electric Field Intensity*, Electronics Letters 16, pp. 406-407 (1980).
- [22] IEC 60833, *Measurement of power frequency electric fields* (1987).
- [23] IEC 61000-2-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 5: Classification of electromagnetic environments – Basic EMC publication* (1995).
- [24] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *An Evaluation of Instrumentation Used to Measure AC Power System Magnetic Fields*, IEEE Transactions on Power Delivery 6, pp. 373-383 (1991).
- [25] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *Measurement of Power Frequency Magnetic Fields Away from Power Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery 6, pp. 901-911 (1991).
- [26] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *A Protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields*, IEEE Transactions on Power Delivery 8, pp. 386-1394 (1993); IEEE Magnetic Fields Task Force Report, *Correction to A Protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields*, *Ibid* 9, p. 606 (1994).
- [27] IEEE Std 644-1994 (Revision of IEEE Std 644-1987), *IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines* (1994).
- [28] IEEE Std 1140-1994, *IEEE Standard Procedures for the Measurement of Electric and Magnetic Fields from Video Display Terminals (VDTs) from 5 Hz to 400 kHz* (1994).
- [29] IRPA/INIRC, *Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields*, Health Physics 58, pp. 113-122 (1990).

- [30] ISO 1000: *Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités* (Organisation Internationale de normalisation, Genève, Suisse) (1992).
- [31] ISO Guide 25: 1990, *Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais*, (Organisation Internationale de normalisation, Genève, Suisse).
- [32] KAUNE, W.T., NIPLE, J.C., *et al.*, *Small integrating meter for assessing long-term exposure to magnetic fields*, *Bioelectromagnetics* 13, pp. 413-427 (1992).
- [33] KAUNE, W.T., STEVENS, R.G., CALLAHAN, N.J., SEVERSON, R.K. et THOMAS, D.B., *Residential Magnetic and Electric Fields*, *Bioelectromagnetics* 8, pp. 315-335 (1987).
- [34] KIRKHAM, H., JOHNSTON, A., JACKSON, S. et SHEU, K., *AC and DC Electric Field Meters Developed for the U.S. Department of Energy*, Jet Propulsion Laboratory Report prepared for U.S. Department of Energy, JPL Publication 87-20 (Février, 1987).
- [35] KIRSCHVINK, J.L., *Uniform Magnetic Fields and Double Wrapped Coil Systems*, *Bioelectromagnetics* 13, pp. 401-411 (1992).
- [36] KOTTER, F.R. et MISAKIAN, M., *AC Transmission Line Field Measurements*, NBS report prepared for the Department of Energy, Novembre, 1977, available as report PB82133554 from NTIS, Springfield, VA 22161.
- [37] LENZ, J.E., *A Review of Magnetic Sensors*, *Proceedings of the IEEE* 78, pp. 973-989 (1990).
- [38] LONDON, S.J., THOMAS, D.C., BOWMAN, J.D., *et al.*, *Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia*, *Am. J. Epidemiol.* 134, pp. 923-937 (1991).
- [39] MADER, D.L., et PERALTA, S.B., *Residential Exposure to 60-Hz Magnetic Fields From Appliances*, *Bioelectromagnetics* 13, pp. 287-301 (1992).
- [40] MAMISHEV, A.V. et RUSSELL, B.D., *Measurement of magnetic fields in the direct proximity of power line conductors*, *IEEE Transactions on Power Delivery* 10, pp. 1211-1216 (1995).
- [41] MERCHANT, C.J., RENEW, R.C. et SWANSON, J., *Exposure to power frequency magnetic fields in the home*, *J. Radiol. Prot.* 14, pp. 77-87 (1994).
- [42] MIHAILEANU, C., *et al.*, *Electrical Field Measurements in the Vicinity of HV Equipment and Assessment of its Biophysiological Perturbing Effects*, CIGRE Paper 36-08, Paris, France, (1976).
- [43] MISAKIAN, M., *Calibration of Flat 60-Hz Electric Field Probes*, *Bioelectromagnetics* 5, pp. 447-450 (1984).
- [44] MISAKIAN, M., Discussion of [65] (1985).
- [45] MISAKIAN, M., *In vitro exposure parameters with linearly and circularly polarized ELF magnetic fields*, *Bioelectromagnetics* 12, pp. 377-381 (1991).

- [30] ISO 1000, *SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units*, (International Organization of Standards, Geneva, Switzerland)(1992).
- [31] ISO Guide 25, *General requirements for the competence of calibration and testing laboratories*, (International Organization of Standards, Geneva, Switzerland)(1990).
- [32] KAUNE, W.T., NIPLE, J.C., *et al.*, *Small integrating meter for assessing long-term exposure to magnetic fields*, *Bioelectromagnetics* 13, pp. 413-427 (1992).
- [33] KAUNE, W.T., STEVENS, R.G., CALLAHAN, N.J., SEVERSON, R.K. and THOMAS, D.B., *Residential Magnetic and Electric Fields*, *Bioelectromagnetics* 8, pp. 315-335 (1987).
- [34] KIRKHAM, H., JOHNSTON, A., JACKSON, S. and SHEU, K., *AC and DC Electric Field Meters Developed for the U.S. Department of Energy*, Jet Propulsion Laboratory Report prepared for U.S. Department of Energy, JPL Publication 87-20 (February, 1987).
- [35] KIRSCHVINK, J.L., *Uniform Magnetic Fields and Double Wrapped Coil Systems*, *Bioelectromagnetics* 13, pp. 401-411 (1992).
- [36] KOTTER, F.R. and MISAKIAN, M., *AC Transmission Line Field Measurements*, NBS report prepared for the Department of Energy, November, 1977, available as report PB82133554 from NTIS, Springfield, VA 22161.
- [37] LENZ, J.E., *A Review of Magnetic Sensors*, *Proceedings of the IEEE* 78, pp. 973-989 (1990).
- [38] LONDON, S.J., THOMAS, D.C., BOWMAN, J.D., *et al.*, *Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia*, *Am. J. Epidemiol.* 134, pp. 923-937 (1991).
- [39] MADER, D.L., and PERALTA, S.B., *Residential Exposure to 60-Hz Magnetic Fields From Appliances*, *Bioelectromagnetics* 13, pp. 287-301 (1992).
- [40] MAMISHEV, A.V. and RUSSELL, B.D., *Measurement of magnetic fields in the direct proximity of power line conductors*, *IEEE Transactions on Power Delivery* 10, pp. 1211-1216 (1995).
- [41] MERCHANT, C.J., RENEW, R.C. and SWANSON, J., *Exposure to power frequency magnetic fields in the home*, *J. Radiol. Prot.* 14, pp. 77-87 (1994).
- [42] MIHAILEANU, C., *et al.*, *Electrical Field Measurements in the Vicinity of HV Equipment and Assessment of its Biophysiological Perturbing Effects*, CIGRE Paper 36-08, Paris, France, (1976).
- [43] MISAKIAN, M., *Calibration of Flat 60-Hz Electric Field Probes*, *Bioelectromagnetics* 5, pp. 447-450 (1984).
- [44] MISAKIAN, M., Discussion of [65] (1985).
- [45] MISAKIAN, M., *In vitro exposure parameters with linearly and circularly polarized ELF magnetic fields*, *Bioelectromagnetics* 12, pp. 377-381 (1991).

- [46] MISAKIAN, M., *Coil Probe Dimensions and Uncertainties During Measurements of Nonuniform ELF Magnetic Fields*, National Institute of Standards and Technology Journal of Research 98, pp. 287-295 (1993); Misakian, M. et Fenimore, C., *Three-axis Coil Probe Dimensions and Uncertainties During Measurement of Magnetic Fields from Appliances*, *ibid.* 99, pp. 247-253 (1994).
- [47] MISAKIAN, M. et FENIMORE, C., *Distributions of Measurement Error for Three-Axis Magnetic Field Meters During Measurements Near Appliances*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45, pp.244-249 (1996).
- [48] MISAKIAN, M. et FULCOMER, P.M., *Measurement of Nonuniform Power Frequency Electric Field*, IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-18, pp. 657-661 (1983).
- [49] MISAKIAN, M., et KOTTER, F.R., Discussion of [14] (1978).
- [50] MISAKIAN, M., SHEPPARD, A.R., KRAUSE, D., FRAZIER, M.E., et MILLER, D.L., *Biological, Physical, and Electrical Parameters for In Vitro Studies With ELF Magnetic and Electric Fields: A Primer*, Bioelectromagnetics Supplement 2, 1-73 (1993).
- [51] MPR (1990:10) Mat och Provstyrelse, Swedish National Metrology and Testing Council, *Test methods for visual display terminals* (1990).
- [52] NCRP *A Practical Guide to the Determination of Human Exposure to Radiofrequency Fields*, National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 119 (1993).
- [53] NISSEN, J., et PAULSSON, L.-E., *Influence of Field Inhomogeneity in Magnetic Calibration Coils*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45, pp. 304-306 (1996).
- [54] OLSEN, R.G., DENO, D, et BAISHIKI, R.S., *Magnetic Fields from Electric Power Lines, Theory and Comparison to Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery 3, pp. 2127-2136 (1988).
- [55] PRIMDAHL, F., *The fluxgate magnetometer*, Journal of Physics E, Scientific Instruments 12, pp. 241-253 (1979).
- [56] RAMO, S. et WHINNERY, J.R., *Fields and Waves in Modern Radio*, New York: John Wiley, p. 141 ff (1944).
- [57] REILLY, J.P., *et al.*, *Electric and Magnetic Field Coupling from High-Voltage AC Power Transmission Lines – Classification of Short Term Effects on People*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-97, pp. 2243-2252 (1978).
- [58] REITZ, J.R. et MILFORD, F.J. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Reading, MA: Addison-Wesley, p. 52 (1960).
- [59] SAHL, J.D., KELSH, M.A. et GREENLAND, S., *Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among utility workers*, Epidemiology 4, pp. 104-114 (1993).
- [60] SAVITZ, D.A. et LOOMIS, D.P., *Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electrical utility workers*, Am. J. Epidemiology 141, pp. 123-134 (1995).

- [46] MISAKIAN, M., *Coil Probe Dimensions and Uncertainties During Measurements of Nonuniform ELF Magnetic Fields*, National Institute of Standards and Technology Journal of Research 98, pp. 287-295 (1993); MISAKIAN, M. and FENIMORE, C., *Three-axis Coil Probe Dimensions and Uncertainties During Measurement of Magnetic Fields from Appliances*, *ibid.* 99, pp. 247-253 (1994).
- [47] MISAKIAN, M. and FENIMORE, C., *Distributions of Measurement Error for Three-Axis Magnetic Field Meters During Measurements Near Appliances*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45, pp. 244-249 (1996).
- [48] MISAKIAN, M. and FULCOMER, P.M., *Measurement of Nonuniform Power Frequency Electric Field*, IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-18, pp. 657-661 (1983).
- [49] MISAKIAN, M., and KOTTER, F.R., Discussion of [14] (1978).
- [50] MISAKIAN, M., SHEPPARD, A.R., KRAUSE, D., FRAZIER, M.E., and MILLER, D.L., *Biological, Physical, and Electrical Parameters for In Vitro Studies With ELF Magnetic and Electric Fields: A Primer*, Bioelectromagnetics Supplement 2, 1-73 (1993).
- [51] MPR (1990:10) Mat och Provstyrelse, Swedish National Metrology and Testing Council, *Test methods for visual display terminals* (1990).
- [52] NCRP *A Practical Guide to the Determination of Human Exposure to Radiofrequency Fields*, National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 119 (1993).
- [53] NISSEN, J., and PAULSSON, L.-E., *Influence of Field Inhomogeneity in Magnetic Calibration Coils*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 45, pp. 304-306 (1996).
- [54] OLSEN, R.G., DENO, D., and BAISHIKI, R.S., *Magnetic Fields from Electric Power Lines, Theory and Comparison to Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery 3, pp. 2127-2136 (1988).
- [55] PRIMDAHL, F., *The fluxgate magnetometer*, Journal of Physics E, Scientific Instruments 12, pp. 241-253 (1979).
- [56] RAMO, S. and WHINNERY, J.R., *Fields and Waves in Modern Radio*, New York: John Wiley, p. 141 ff (1944).
- [57] REILLY, J.P., *et al.*, *Electric and Magnetic Field Coupling from High-Voltage AC Power Transmission Lines – Classification of Short Term Effects on People*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-97, pp. 2243-2252 (1978).
- [58] REITZ, J.R. and MILFORD, F.J. *Foundations of Electromagnetic Theory*. Reading, MA: Addison-Wesley, p. 52 (1960).
- [59] SAHL, J.D., KELSH, M.A. and GREENLAND, S., *Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among utility workers*, Epidemiology 4, pp. 104-114 (1993).
- [60] SAVITZ, D.A. and LOOMIS, D.P., *Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electrical utility workers*, Am. J. Epidemiology 141, pp. 123-134 (1995).

- [61] SICREE, R.M., RAUCH, G.B., et DIETRICH, F.M., *Comparison of Magnetic Flux Density Meter Responses Over A Database of Residential Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery 8, pp. 607-619 (1993).
- [62] SILVA, M., HUMMON, N., RUTTER, D. et HOOPER, C., *Power frequency magnetic fields in homes*, IEEE Trans. Power Delivery 4, pp. 465-477 (1989).
- [63] STRATTON, J.A., *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw-Hill, p. 437 (1941).
- [64] SWANSON, J., *Measurement of static magnetic fields in homes in the UK and their implications for epidemiological studies of exposure to alternating magnetic fields*, J. Radiol. Prot. 14, pp. 67-75 (1994).
- [65] TAKUMA, T., KAWAMOTO, T., et SUNAGA, Y., *Analysis of Calibration Arrangements for AC Field Strength Meters*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104, pp.489-496 (1985).
- [66] TENFORDE, T.S. et KAUNE, W.T., *Interaction of extremely low-frequency electric and magnetic fields with humans*, Health Physics 53, pp. 585-606 (1987).
- [67] THERIAULT, G., GOLDBERG, M., MILLER, A.B., et al., *Cancer risks associated with occupational exposures to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970-1989*, Am. J. Epidemiol. 139, pp. 550-572 (1994).
- [68] VINH, T., JONES, T.L., et SHIH, C.H., *Magnetic Fields Near Overhead Distribution Lines- Measurements and Estimating Techniques*, IEEE Transactions on Power Delivery 6, pp. 912-921 (1991).
- [69] WEBER, E., *Electromagnetic Theory*, New York: Dover, pp. 131-133 (1965).



- [61] SICREE, R.M., RAUCH, G.B., and DIETRICH, F.M., *Comparison of Magnetic Flux Density Meter Responses Over A Database of Residential Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery 8, pp. 607-619 (1993).
- [62] SILVA, M., HUMMON, N., RUTTER, D. and HOOPER, C., *Power frequency magnetic fields in homes*, IEEE Trans. Power Delivery 4, pp. 465-477 (1989).
- [63] STRATTON, J.A., *Electromagnetic Theory*, New York: McGraw-Hill, p. 437 (1941).
- [64] SWANSON, J., *Measurement of static magnetic fields in homes in the UK and their implications for epidemiological studies of exposure to alternating magnetic fields*, J. Radiol. Prot. 14, pp. 67-75 (1994).
- [65] TAKUMA, T., KAWAMOTO, T., and SUNAGA, Y., *Analysis of Calibration Arrangements for AC Field Strength Meters*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104, pp.489-496 (1985).
- [66] TENFORDE, T.S. and KAUNE, W.T., *Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans*, Health Physics 53, pp. 585-606 (1987).
- [67] THERIAULT, G., GOLDBERG, M., MILLER, A.B., *et al.*, *Cancer risks associated with occupational exposures to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France:1970-1989*, Am. J. Epidemiol. 139, pp. 550-572 (1994).
- [68] VINH, T., JONES, T.L., and SHIH, C.H., *Magnetic Fields Near Overhead Distribution Lines-Measurements and Estimating Techniques*, IEEE Transactions on Power Delivery 6, pp. 912-921 (1991).
- [69] WEBER, E., *Electromagnetic Theory*, New York: Dover, pp. 131-133 (1965).
-

www.3gpp.org



Standards Survey

The IEC would like to offer you the best quality standards possible. To make sure that we continue to meet your needs, your feedback is essential. Would you please take a minute to answer the questions overleaf and fax them to us at +41 22 919 03 00 or mail them to the address below. Thank you!

Customer Service Centre (CSC)

International Electrotechnical Commission

3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Switzerland

or

Fax to: **IEC/CSC** at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standard-making process.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 GENEVA 20
Switzerland



Q1 Please report on **ONE STANDARD** and **ONE STANDARD ONLY**. Enter the exact number of the standard: (e.g. 60601-1-1)

.....

Q2 Please tell us in what capacity(ies) you bought the standard (tick all that apply). I am the/a:

- purchasing agent
- librarian
- researcher
- design engineer
- safety engineer
- testing engineer
- marketing specialist
- other.....

Q3 I work for/in/as a: (tick all that apply)

- manufacturing
- consultant
- government
- test/certification facility
- public utility
- education
- military
- other.....

Q4 This standard will be used for: (tick all that apply)

- general reference
- product research
- product design/development
- specifications
- tenders
- quality assessment
- certification
- technical documentation
- thesis
- manufacturing
- other.....

Q5 This standard meets my needs: (tick one)

- not at all
- nearly
- fairly well
- exactly

Q6 If you ticked NOT AT ALL in Question 5 the reason is: (tick all that apply)

- standard is out of date
- standard is incomplete
- standard is too academic
- standard is too superficial
- title is misleading
- I made the wrong choice
- other

Q7 Please assess the standard in the following categories, using the numbers:

- (1) unacceptable,
- (2) below average,
- (3) average,
- (4) above average,
- (5) exceptional,
- (6) not applicable

- timeliness.....
- quality of writing.....
- technical contents.....
- logic of arrangement of contents
- tables, charts, graphs, figures.....
- other

Q8 I read/use the: (tick one)

- French text only
- English text only
- both English and French texts

Q9 Please share any comment on any aspect of the IEC that you would like us to know:

.....





Enquête sur les normes

La CEI ambitionne de vous offrir les meilleures normes possibles. Pour nous assurer que nous continuons à répondre à votre attente, nous avons besoin de quelques renseignements de votre part. Nous vous demandons simplement de consacrer un instant pour répondre au questionnaire ci-après et de nous le retourner par fax au +41 22 919 03 00 ou par courrier à l'adresse ci-dessous. Merci !

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembé

1211 Genève 20

Suisse

ou

Télécopie: **CEI/CSC** +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembé

1211 GENÈVE 20

Suisse



Q1 Veuillez ne mentionner qu'**UNE SEULE NORME** et indiquer son numéro exact: (ex. 60601-1-1)

.....

Q2 En tant qu'acheteur de cette norme, quelle est votre fonction? (cochez tout ce qui convient)
Je suis le/un:

- agent d'un service d'achat
- bibliothécaire
- chercheur
- ingénieur concepteur
- ingénieur sécurité
- ingénieur d'essais
- spécialiste en marketing
- autre(s).....

Q3 Je travaille: (cochez tout ce qui convient)

- dans l'industrie
- comme consultant
- pour un gouvernement
- pour un organisme d'essais/ certification
- dans un service public
- dans l'enseignement
- comme militaire
- autre(s).....

Q4 Cette norme sera utilisée pour/comme (cochez tout ce qui convient)

- ouvrage de référence
- une recherche de produit
- une étude/développement de produit
- des spécifications
- des soumissions
- une évaluation de la qualité
- une certification
- une documentation technique
- une thèse
- la fabrication
- autre(s).....

Q5 Cette norme répond-elle à vos besoins: (une seule réponse)

- pas du tout
- à peu près
- assez bien
- parfaitement

Q6 Si vous avez répondu PAS DU TOUT à Q5, c'est pour la/les raison(s) suivantes: (cochez tout ce qui convient)

- la norme a besoin d'être révisée
- la norme est incomplète
- la norme est trop théorique
- la norme est trop superficielle
- le titre est équivoque
- je n'ai pas fait le bon choix
- autre(s)

Q7 Veuillez évaluer chacun des critères ci-dessous en utilisant les chiffres (1) inacceptable, (2) au-dessous de la moyenne, (3) moyen, (4) au-dessus de la moyenne, (5) exceptionnel, (6) sans objet

- publication en temps opportun
- qualité de la rédaction.....
- contenu technique
- disposition logique du contenu
- tableaux, diagrammes, graphiques, figures
- autre(s)

Q8 Je lis/utilise: (une seule réponse)

- uniquement le texte français
- uniquement le texte anglais
- les textes anglais et français

Q9 Veuillez nous faire part de vos observations éventuelles sur la CEI:

.....
.....
.....
.....
.....



www.iec.ch

ISBN 2-8318-4480-0



9 782831 844800

ICS 17.220.20

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND