

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60833

Première édition
First edition
1987-11

**Mesure des champs électriques
à fréquence industrielle**

Measurement of power-frequency electric fields



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60833: 1987

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 utilisés 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**

60833

Première édition
First edition
1987-11

**Mesure des champs électriques
à fréquence industrielle**

Measurement of power-frequency electric fields

© IEC 1987 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

T

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

SOMMAIRE

	Pages
PREAMBULE	4
PREFACE	4
 Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Définitions	6
3.1 Intensité du champ électrique	6
3.2 Champs alternatifs monophasés	6
3.3 Champs alternatifs triphasés	8
4. Appareils de mesure de l'intensité du champ	8
4.1 Généralités	8
4.2 Appareils du type à potentiel flottant	10
4.3 Appareils du type se référant au potentiel du sol	12
4.4 Appareils du type électro-optique	12
5. Champ d'étalonnage et vérification de l'étalonnage	14
5.1 Généralités	14
5.2 Production d'un champ uniforme pour l'étalonnage à l'aide de plaques parallèles	16
5.3 Vérification de l'étalonnage par injection de courant	18
6. Procédure d'étalonnage	20
7. Mesures de l'intensité du champ électrique	22
7.1 Généralités	22
7.2 Lignes de transport triphasées	22
7.3 Configuration sphère-plan	26
7.4 Détermination des effets de proximité	28
8. Imprécisions dans la mesure de l'intensité du champ	28
ANNEXE A - Paramètres qui affectent la précision des mesures de l'intensité du champ	30
Tableau 1	40
Figures	41

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. Definitions	7
3.1 Electric field strength	7
3.2 Single-phase a.c. fields	7
3.3 Three-phase a.c. fields	9
4. Field strength measuring instruments	9
4.1 General	9
4.2 Free-body meters	11
4.3 Ground-reference meters	13
4.4 Electro-optic meters	13
5. Calibration field and calibration check	15
5.1 General	15
5.2 Production of a uniform calibration field with parallel plates	17
5.3 Current-injection calibration check	19
6. Calibration procedure	21
7. Field strength measurements	23
7.1 General	23
7.2 Three-phase transmission lines	23
7.3 Sphere-plane configuration	27
7.4 Determination of proximity effects	29
8. Field strength measurement uncertainties	29
APPENDIX A - Parameters affecting accuracy of field strength measurements	31
Table 1	40
Figures	41

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MESURE DES CHAMPS ELECTRIQUES A FREQUENCE INDUSTRIELLE

PREAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PREFACE

La présente norme a été établie par le Comité d'Etudes n° 42 de la CEI: Technique des essais à haute tension.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
42(BC)37	42(BC)38

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT OF POWER-FREQUENCY ELECTRIC FIELDS

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 42: High-voltage Testing Techniques.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
42(C0)37	42(C0)38

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

MESURE DES CHAMPS ELECTRIQUES A FREQUENCE INDUSTRIELLE

1. Domaine d'application

La présente norme est applicable à la mesure de l'intensité du champ électrique aux fréquences industrielles dans l'air, pour des champs électriques quasi uniformes, avec un type d'appareil de mesure habituellement employé et/ou disponible dans le commerce. La norme est applicable aux autres appareils de mesure pour autant qu'ils soient étalonnés selon les procédures décrites dans cette norme.

2. Objet

L'objet de la présente norme est:

- de définir les termes employés;
- de décrire les principes de base de fonctionnement des appareils de mesure;
- de spécifier les méthodes d'étalonnage et de vérification de l'étalonnage;
- de spécifier les procédures pour la mesure de l'intensité du champ électrique;
- d'identifier les causes majeures d'erreur de mesure et donner les limites des incertitudes admissibles.

3. Définitions

3.1 *Intensité du champ électrique*

Lorsqu'un conducteur est électriquement chargé, l'espace dans son voisinage est influencé de telle sorte qu'une particule chargée, lorsqu'elle est introduite dans le domaine concerné, subit une force dans une direction définie à tout instant. On dit qu'un champ électrique existe dans l'espace concerné, et l'intensité du champ électrique en tout point est une grandeur vectorielle égale à la force agissant sur une charge positive unitaire située en ce point. Deux types de champs électriques sont examinés dans cette norme, les champs électriques alternatifs monophasés et triphasés. L'amplitude de l'intensité du champ électrique s'exprime en volts par mètre.

3.2 *Champs alternatifs monophasés*

Une source de tension alternative monophasée, lorsqu'elle est raccordée à des surfaces limites conductrices (par exemple des électrodes), produit dans l'espace concerné un vecteur champ électrique qui oscille suivant un axe déterminé.

MEASUREMENT OF POWER-FREQUENCY ELECTRIC FIELDS

1. Scope

This standard is applicable to the measurement of electric field strength at power frequencies in air for quasi-uniform electric fields with instrumentation in common use and/or commercially available. The standard is applicable to other instruments provided they are calibrated according to the procedures described in this standard.

2. Object

The objects of this standard are:

- to define the terms used;
- to describe the basic operating principles of measuring instruments;
- to specify methods for calibration and calibration checks;
- to specify electric field strength measurement procedures;
- to identify significant sources of measurement error and to give limits of permissible uncertainties.

3. Definitions

3.1 *Electric field strength*

When a conductor is electrically charged, the space in the vicinity of the conductor is affected so that a charged particle, when introduced into the affected space, experiences a force in a well-defined direction at any instant. An electric field is said to exist in the affected space, and the electric field strength at any point is a vector quantity equal to the force per unit positive charge located at that point. Two types of electric fields are considered in this document, single-phase a.c. fields and three-phase a.c. fields. The field strength magnitude is specified in units of volts per metre.

3.2 *Single-phase a.c. fields*

A single-phase source of alternating voltage, when connected to conducting boundary surfaces (for example, electrodes), produces at any point in the affected space an electric field vector which oscillates along a fixed axis.

3.3 Champs alternatifs triphasés

Une source de tension alternative triphasée, lorsqu'elle est raccordée à des surfaces limites conductrices (par exemple des électrodes), produit un vecteur champ électrique qui, en général, tourne dans l'espace. Le vecteur tournant décrit une ellipse dont le demi grand axe représente l'amplitude et la direction de la valeur maximale du champ électrique, et dont le demi petit axe représente l'amplitude et la direction de la valeur minimale du champ électrique, qui se produit un quart de période plus tard que la maximale. Sur les surfaces limites conductrices, le vecteur tournant devient oscillant et sa direction est perpendiculaire à la surface.

4. Appareils de mesure de l'intensité du champ

4.1 Généralités

Trois types d'appareils pour la mesure de l'intensité du champ électrique sont considérés dans la présente norme. Ce sont:

- a) le type à potentiel flottant;
- b) le type se référant au potentiel du sol;
- c) le type électro-optique.

Fondamentalement, un appareil de mesure de l'intensité du champ électrique présente deux parties, la sonde (sensible au champ) et le détecteur qui comprend le circuit de traitement du signal et un indicateur analogique ou numérique. Lorsqu'on effectue des mesures de l'intensité du champ, il est recommandé que l'observateur soit suffisamment éloigné de la sonde pour éviter toute perturbation significative du champ à l'endroit de la sonde (paragraphes 7.2, 7.3 et 7.4). La dimension de la sonde sera telle que les distributions de charge sur les surfaces limites qui génèrent le champ (surfaces sous tension et mises à la terre) ne soient pas perturbées de manière significative lorsque la sonde y est introduite (paragraphes 5.2, 7.2 et 7.3). Bien que l'appareil de mesure de champ soit étalonné dans un champ pratiquement uniforme (paragraphe 5.2), le champ mesuré peut ne pas être très uniforme (annexe A, article A8). Les appareils de mesure de champ mesurent la projection du vecteur champ électrique oscillant ou tournant sur l'axe principal de la sonde. Les appareils de mesure de champ sont étalonnés pour lire la valeur efficace de l'intensité du champ électrique dans l'hypothèse d'un champ purement sinusoïdal. Les sondes à potentiel flottant qui mesurent simultanément les trois composantes orthogonales de l'intensité du champ ou un point de l'espace (sonde à trois dimensions) peuvent être utilisées pour la mesure de l'intensité maximale du champ. De telles sondes ne sont pas examinées en détail dans la présente norme car elles peuvent être considérées comme une extension des appareils de mesure à potentiel flottant qui sont examinés ci-après.

3.3 *Three-phase a.c. fields*

A three-phase source of alternating voltage, when connected to conducting boundary surfaces (for example, electrodes) produces an electric field vector which, in general, rotates in space. The rotating vector describes an ellipse whose semi-major axis represents the magnitude and direction of the maximum value of the electric field, and whose semi-minor axis represents the magnitude and direction of the minimum value of the electric field, which occurs a quarter cycle later than the maximum. On conducting boundary surfaces, the rotating vector becomes an oscillating vector whose direction is perpendicular to the surface.

4. Field strength measuring instruments

4.1 *General*

Three types of instrumentation for the measurement of electric field strength are considered in this standard. They are:

- a) the free-body type;
- b) the ground-reference type;
- c) the electro-optic type.

Basically an electric field strength meter has two parts, the probe or field sensor and the detector which consists of signal-processing circuitry with an analogue or digital display. When field strength measurements are performed, the observer should be sufficiently removed from the probe to avoid significant perturbation of the field at the location of the probe (Sub-clauses 7.2, 7.3 and 7.4). The size of the probe should be such that charge distributions on the boundary surfaces generating the field (energized and grounded surfaces) are not significantly perturbed when the probe is introduced for measurements (Sub-clauses 5.2, 7.2 and 7.3). While the field meter is calibrated in a nearly uniform field (Sub-clause 5.2), the field that is measured need not be very uniform (Appendix A, Clause A8). The field meters measure the projection of the oscillating or rotating electric field vector onto the main axis of the probe. The field meters are calibrated to read the r.m.s. value of the electric field strength assuming a pure sinusoidal field. Free-body probes which simultaneously measure three orthogonal components of the electric field strength at a point in space (three-coordinate-probe) can be used for measuring the maximum field strength. Such probes are not discussed in detail in this standard because they are considered to be extensions of the free-body type meters discussed below.

4.2 Appareils du type à potentiel flottant

Les appareils de mesure de champ à potentiel flottant fonctionnent en mesurant le courant induit ou la charge induite à fréquence industrielle entre deux parties d'un corps conducteur isolé introduit dans le champ à mesurer. La sonde à potentiel flottant est adaptée aux mesures sur site parce qu'elle est portable, permet la mesure au-dessus du niveau du sol, et ne nécessite pas une référence au sol connue. Dans le cas des appareils de mesure à potentiel flottant, le détecteur peut être contenu dans la sonde. La sonde et le détecteur sont introduits dans le champ électrique en utilisant une perche isolante. Il existe aussi des appareils de mesure à potentiel flottant conçus pour afficher à distance l'intensité du champ électrique. Dans ce cas, une partie du circuit de traitement du signal est contenue dans la sonde et le reste du détecteur est dans un ensemble séparé comportant un indicateur analogique ou numérique. Une liaison par fibre optique relie la sonde à l'élément indicateur. Ce type de sonde est également introduit dans le champ électrique à l'aide d'une perche isolante. Les appareils de mesure de champ à potentiel flottant fonctionnent habituellement sur pile.

Des formes typiques d'appareils de mesure de champ à potentiel flottant sont montrées aux figures 1a, 1b, et 1c, page 41. Toutes les sondes peuvent être considérées comme des dipôles. Quand une sonde sphérique (figure 1a) est introduite dans un champ uniforme de telle sorte que le plan de séparation des deux hémisphères soit perpendiculaire au champ, la valeur efficace de la charge induite, Q , sur un des hémisphères est donnée par:

$$Q = 3\pi\epsilon_0 r^2 E \quad (1)$$

où:

ϵ_0 est la permittivité du vide

r est le rayon de la sphère

E est l'intensité du champ électrique uniforme (valeur efficace)

Dans l'équation (1) la dépendance temporelle sinusoïdale de Q a été omise. Il en sera de même dans tout le document. L'équation (1) montre que la mesure de la charge induite fournit une mesure de l'intensité du champ électrique. De manière similaire, la mesure du courant induit, I , obtenue par calcul électronique de la dérivée de la charge, permet aussi de déterminer l'intensité du champ électrique. A savoir,

$$I = 3\pi\epsilon_0 \omega r^2 E \quad (2)$$

où ω est la pulsation ($2\pi f$).

Pour le type à boîtier moins symétrique et les dipôles à plaques parallèles (figures 1b et 1c), les équations (1) et (2) sont respectivement remplacées par des équations de la forme:

$$Q = kE \quad (3)$$

et

$$I = k\omega E \quad (4)$$

où k est un coefficient qui dépend de la géométrie et est déterminé par étalonnage. Les appareils de mesure de champ à plaques parallèles

4.2 Free-body meters

The free-body field meters operate by measuring the power frequency induced current or induced charge between two sections of an isolated conductive body introduced into the field to be measured. The free-body probe is suitable for survey-type measurements because it is portable, allows measurement above the ground plane, and does not require a known ground reference. For free-body meters, the detector can be contained in, or be an integral part of, the probe. The probe and detector are introduced into an electric field on an insulating handle. There also exist 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. This type of probe is also introduced into the electric field using an insulating handle. Free-body field meters are typically battery-operated.

Typical shapes of free-body field meters are shown in Figures 1a, 1b and 1c, page 41. All the probes can be considered to be dipoles. When the spherical probe (Figure 1a) is placed in a uniform field so that the plane of separation of the two hemispheres is perpendicular to the field, the r.m.s. value of the induced charge, Q , on one of the hemispheres is given by:

$$Q = 3\pi\epsilon_0 r^2 E \quad (1)$$

where:

ϵ_0 is the permittivity of vacuum

r is the sphere radius

E is the uniform electric field strength, r.m.s.

The sinusoidal time dependence of Q in equation (1) has been suppressed. This practice will be maintained throughout the document. Equation (1) shows that measurement of the induced charge provides a measure of the electric field strength. Similarly, measuring the induced current, I , by electronically differentiating the charge also permits the determination of the field strength. That is,

$$I = 3\pi\epsilon_0 \omega r^2 E \quad (2)$$

where ω is the angular frequency ($2\pi f$).

For the less symmetric box-type and parallel-plate dipoles (Figures 1b and 1c) equations (1) and (2) are replaced respectively with equations of the form:

$$Q = kE \quad (3)$$

and

$$I = k\omega E \quad (4)$$

where k is a coefficient which depends on geometry and is determined by calibration. Parallel-plate field meters (Figure 1c) have detectors

(figure 1c) ont des détecteurs qui déterminent l'intensité du champ électrique par mesure, soit de la différence entre les charges induites sur les plaques, soit du courant induit.

4.3 Appareils du type se référant au potentiel du sol

Ces types d'appareils sont utilisés pour mesurer l'intensité du champ au niveau du sol. La sonde peut comporter une plaque et une électrode de garde mise à la terre disposées sur un mince support isolant, ou deux plaques parallèles séparées par une mince couche d'isolant comme montré à la figure 1d, page 41. Dans ce dernier cas, la plaque inférieure est raccordée au sol; dans les deux cas, l'électrode active est raccordée au détecteur à l'aide d'un câble blindé. Dans l'hypothèse où il n'y a pas d'effet de bord, la charge induite sur l'électrode active est donnée par:

$$Q = S\epsilon_0 E \quad (5)$$

où S est la surface de l'électrode active.

La dérivée de la charge induite conduit à la relation

$$I = S\omega\epsilon_0 E \quad (6)$$

Les équations (5) et (6) indiquent de nouveau que la mesure de la charge induite ou du courant induit permet de connaître l'intensité du champ électrique.

Du fait que la sonde est constituée par une surface plane et que son utilisation est limitée aux surfaces au sol planes, la perturbation dans les distributions de charge sur les surfaces limites est normalement insignifiante. Bien que la sonde puisse être utilisée dans des champs non uniformes, il est à noter que l'intensité du champ mesurée est celle à la surface de la sonde. Les appareils de mesure de champ se référant au potentiel du sol peuvent être alimentés par pile ou par un réseau, mais nécessitent le potentiel de référence du sol.

Il convient de noter que la sonde représentée à la figure 1d peut aussi être employée sur des surfaces planes sous tension à condition que le potentiel de référence du détecteur soit le même que celui de la surface sous tension. Des dispositions doivent être prises pour une lecture à distance de l'indicateur analogique ou numérique (par exemple utilisation d'une liaison à fibre optique ou lecture à distance de l'indicateur).

4.4 Appareils du type électro-optique

Les appareils de mesure de champ du type électro-optique considérés dans la présente norme sont basés sur l'effet Pockels dans un cristal diélectrique en vue de déterminer l'intensité du champ électrique. Comme l'appareil de mesure à potentiel flottant, ils sont utilisables pour les mesures sur site parce qu'ils sont portatifs, permettent des mesures au-dessus du niveau du sol et ne nécessitent pas le potentiel de référence du sol. La sonde diélectrique et le détecteur sont reliés à l'aide de fibres optiques dans lesquelles la lumière ayant sa source dans le détecteur est transmise à la sonde et en revient. La sonde peut être introduite dans le champ diélectrique à l'aide d'une perche

that determine the field strength by measuring the difference between charges induced on the plates, or the induced current.

4.3 *Ground-reference meters*

These types of instruments are used to measure the field strength at ground level. The probe can consist of one plate with a grounded guard electrode mounted on a thin insulating layer, or of two parallel plates separated by a thin sheet of insulation as shown in Figure 1d, page 41. In the latter case, the lower plate is connected to ground; in both cases, the sensing electrode is connected to the detector with a shielded cable. Assuming no fringing field effects, the charge induced in the sensing electrode is given by:

$$Q = S\epsilon_0 E \quad (5)$$

where S is the area of the sensing plate.

Differentiating the induced charge yields the relationship:

$$I = S\omega\epsilon_0 E \quad (6)$$

Equations (5) and (6) show again that measurement of the induced charge or current allows the determination of field strength.

Because the probe consists of a flat surface and its use is restricted to flat ground planes, perturbation of charge distributions on boundary surfaces is normally insignificant. While the probe can be used in non-uniform fields, it should be noted that the field strength that is measured is that at the surface of the probe. Ground-reference type field meters may be battery- or mains-operated, but require a ground-reference potential.

It is noted that the probe shown in Figure 1d can also be used on energized flat surfaces provided that the reference potential of the detector is the same as that of the energized surface. Provision must be made for remote viewing of the analogue or digital display (for example, using a fibre-optic link or viewing the display from a distance).

4.4 *Electro-optic meters*

The electro-optic type field meters considered in this standard utilize the Pockels effect in a dielectric crystal probe for determining the electric field strength. Like the free-body meter, they are suitable for survey-type measurements because they are portable, allow measurements above the ground plane, and do not require a ground reference potential. The dielectric probe and detector are connected with optical fibres through which the light from a source in the detector is transmitted to and from the probe. The probe can be introduced into the field with an insulating rod. Because of the small dimensions of the

isolante. Compte tenu des petites dimensions de la sonde (≈ 2 cm), la probabilité de perturber les distributions de charge sur les surfaces limites est faible comparée au cas des sondes à potentiel flottant qui ont en général des dimensions plus importantes.

La figure 1e, page 41, donne une vue schématique d'une sonde qui utilise l'effet Pockels. Le champ électrique induit une biréfringence optique dans un cristal diélectrique convenablement orienté; l'amplitude de celle-ci est proportionnelle à l'intensité du champ. L'intensité de la lumière polarisée passant à travers le cristal, qui est quelquefois recouvert d'électrodes optiquement transparentes, et à travers les éléments optiques associés, est modulée par la biréfringence induite et le rapport entre la lumière transmise, I_t , et la lumière incidente, I_i , est donné par:

$$I_t/I_i = (1 + \sin M)/2 \quad (7)$$

où:

$$M = \frac{E}{F_0} \quad F_0 = \frac{\lambda}{2\pi n^3 c l}$$

λ est la longueur d'onde de la lumière
 n est l'indice de réfraction du cristal
 E est l'intensité du champ à l'intérieur du cristal
 l est l'épaisseur du cristal
 c est le coefficient électro-optique

Dans l'équation (7) il est supposé que le cristal n'a pas d'activité optique intrinsèque. L'amplitude de la modulation de la lumière fournit une mesure de l'intensité du champ dans le cristal et indirectement du champ extérieur. Les appareils de mesure de champ du type électro-optique peuvent être alimentés par pile ou par un réseau.

5. Champ d'étalonnage et vérification de l'étalonnage

5.1 Généralités

Un volume de champ électrique uniforme d'intensité connue est nécessaire pour l'étalonnage. Les caractéristiques souhaitables pour un appareillage qui génère le champ d'étalonnage sont:

- Les dimensions de l'appareillage sont suffisamment importantes pour que la sonde ne perturbe pas d'une façon significative les distributions de charge sur les surfaces des électrodes qui génèrent le champ.
- Le volume où le champ est uniforme est suffisant pour réduire à un niveau acceptable l'imprécision sur la valeur de l'intensité du champ à l'emplacement de la sonde.
- Le champ électrique n'est pas perturbé d'une façon significative par les objets voisins, des plans mis à la terre, ou l'opérateur effectuant l'étalonnage.

probe (≈ 2 cm), the likelihood of perturbing charge distributions on boundary surfaces is small compared to free-body type probes which are in general of larger dimensions.

Figure 1e, page 41, provides a schematic view of a probe which employs the Pockels effect. The electric field induces an optical birefringence in a properly-oriented dielectric crystal, the magnitude of which is proportional to the field strength. The intensity of polarized light through the crystal, which is sometimes coated with optically-transparent electrodes, and associated optical elements is modulated by the induced birefringence and the ratio of transmitted light, I_t , to incident light, I_i , is given by:

$$I_t/I_i = (1 + \sin M)/2 \quad (7)$$

where:

$$M = \frac{E}{F_0} \quad F_0 = \frac{\lambda}{2\pi n^3 cl}$$

- λ is the wavelength of light
- n is the index of refraction of the crystal
- E is the field strength inside the crystal
- l is the crystal thickness, and
- c is the electro-optic coefficient

The relation given by equation (7) assumes the crystal has no intrinsic optical activity. The amplitude of light modulation provides a measure of field strength within the crystal and thus indirectly the external field. Electro-optic type field meters may be battery- or mains-operated.

5. Calibration field and calibration check

5.1 General

A volume of uniform electric field of known field strength is required for calibration. Some desirable characteristics of an apparatus which generates the calibration field are:

- a) The dimensions of the apparatus are sufficiently large for the probe not to perturb significantly the charge distributions on the electrode surfaces producing the field.
- b) The volume of uniformity is sufficiently large to reduce the uncertainty in the value of the field strength to an acceptable level at the location of the probe.
- c) The electric field is not significantly perturbed by nearby objects, ground planes, or the operator performing the calibration.

Une fois qu'un appareil de mesure du champ électrique a été étalonné dans un champ connu, il est aussi souhaitable de définir un moyen simple pour vérifier l'étalonnage. Un appareil qui génère un champ pour l'étalonnage avec les caractéristiques indiquées plus haut et une méthode pour vérifier l'étalonnage d'un appareil de mesure de champ préalablement étalonné sont décrits ci-après.

5.2 Production d'un champ uniforme pour l'étalonnage à l'aide de plaques parallèles

Il est possible de générer, en vue d'étalonnage, des domaines avec un champ uniforme d'amplitude et de direction connues, à l'aide de plaques parallèles, à condition que l'écartement des plaques soit suffisamment petit par rapport à leurs dimensions. La valeur E_0 du champ uniforme est donnée par U/d où U est la différence de potentiel appliquée et d l'écartement entre les plaques. Les amplitudes des champs, en valeurs réduites, E/E_0 , à la surface des plaques et à mi-distance entre des plaques parallèles semi-infinies sont indiquées par la figure 2, page 42, en fonction de la distance, en valeur réduite, x/d , à partir du bord de la plaque.

Les courbes de la figure 2 et les valeurs numériques correspondantes du tableau 1 montrent que l'écart par rapport à un champ uniforme, conséquence des effets de bord, est de 0,1% à une distance du bord égale à l'écartement entre les plaques. Pour des plaques carrées de dimensions finies, les effets de bord sur le champ provenant des quatre côtés peuvent être estimés par superposition lorsque l'effet de bord pour un côté est inférieur à 0,1%. Des calculs numériques pour la détermination du champ entre plaques parallèles de dimensions finies conduisent à ce qu'une imprécision de l'ordre de 0,04% existe pour les estimations des effets de bord en utilisant le tableau 1, pour une distance à partir des bords des plaques parallèles égale à l'écartement entre les plaques. Ces résultats sont valables en l'absence de perturbations produites par des objets ou des plans voisins mis à la terre. Cependant, l'amplitude de ces perturbations est réduite si on alimente les plaques parallèles à l'aide d'un transformateur à prise médiane.

Un appareillage valable pour l'étalonnage d'un appareil de mesure de champ à potentiel flottant est représenté à la figure 3, page 43. Des plaques métalliques ou du treillis (dimension des trous ≈ 1 mm) tendu sur des cadres de 1,5 m x 1,5 m avec 0,75 m d'écartement sont utilisés pour constituer la structure dite plaques parallèles. Les plaques sont alimentées à l'aide d'un transformateur à prise médiane, équipé de résistances de limitation de courant à la sortie du transformateur en tant que mesure de sécurité. Par exemple, des résistances de 10 M Ω isolées correctement sont satisfaisantes pour des tensions jusqu'à 10 kV ($E \approx 13$ kV/m). L'observation des consignes de sécurité habituelles dans un laboratoire haute tension est recommandée en cours d'étalonnage. Avec les dimensions mentionnées, un champ dont la valeur s'écarte de l'ordre de 1% par rapport au champ uniforme U/d est établi au centre du système des électrodes. L'appareil de mesure de champ à potentiel flottant est introduit au centre du dispositif avec la perche isolante qui est normalement utilisée lors des mesures. Si l'orientation de la perche (ou de la liaison par fibre optique) peut être variable par rapport à la sonde, l'orientation adoptée au cours de l'étalonnage sera la même que pendant les mesures de champ. Des étalonnages effectués avec des imprécisions de moins de $\pm 1\%$ peuvent être obtenus pour

Once an electric field meter has been calibrated in a known field, a convenient method for checking the calibration is also desirable. A field-generating calibration apparatus with the characteristics noted above and a method for checking the calibration of a previously calibrated field meter are described below.

5.2 Production of a uniform calibration field with parallel plates

Regions of uniform field of known magnitude and direction can be created for calibration purposes with parallel plates, provided that the spacing of the plates, relative to the plate dimensions, is sufficiently small. The uniform field value E_0 is given by U/d where U is the applied potential difference and d is the plate spacing. The magnitudes of the normalized field, E/E_0 , at the plate surfaces and midway between semi-infinite parallel plates are plotted as a function of normalized distance x/d from the plate edge in Figure 2, page 42.

The curves in Figure 2 and the corresponding numerical values in Table 1 show that the departure from uniformity due to fringing field effects is 0.1% at a distance of one plate spacing from the edge. For square plates of finite size, the fringing field effects from four edges can be estimated by superposition when the effect from one edge is less than 0.1%. Numerical calculations of fields between finite-size parallel plates suggest that a discrepancy of approximately 0.04% exists for estimates of fringing fields using the results in Table 1 for a distance of one plate spacing inwards from the edges of the parallel plates. These results are valid in the absence of perturbations due to nearby grounded objects or planes. However, the magnitude of such perturbations is reduced by energizing the parallel plates with a centre-tapped transformer.

An apparatus which is suitable for calibration of a free-body type field meter is shown in Figure 3, page 43. Metal sheets or tightly stretched metal mesh (≈ 1 mm hole size) on 1.5 m x 1.5 m frames with a 0.75 m separation are used to form a parallel-plate structure. The plates are energized with a centre-tapped transformer with adequate current-limiting resistors in the transformer output leads as a safety measure. For example, 10 M Ω resistors of adequate voltage rating are satisfactory for voltages up to 10 kV (i.e., $E \approx 13$ kV/m). Normal high-voltage laboratory safety practices should be observed during the calibration. With the above dimensions, a calibration field which is within 1% of the uniform field value, U/d , is established at the centre of the electrode system. The free-body type field meter is introduced at the centre of the parallel-plate structure with the insulating rod that is normally used for support during field measurements. If the orientation of the handle (or fibre-optic link) can be varied relative to the probe, the orientation during calibration should be the same as that during field measurements. Calibrations with uncertainties of less than $\pm 1\%$ can be obtained provided that the field meter to be

autant que l'appareil de mesure de champ à étalonner ne présente pas une dimension diagonale supérieure à 0,23 m. La distance entre les bords des plaques et les plans voisins mis à la terre (murs, planchers, etc.) ou les objets, sera au moins de 0,5 m. Les dimensions des plaques parallèles peuvent être augmentées ou réduites en fonction des dimensions de l'appareil de mesure de champ. Du fait que les sondes du type électro-optique présentent des dimensions plus petites que les appareils de mesure de champ à potentiel flottant, une version à échelle réduite du système à plaques parallèles est acceptable pour l'étalonnage d'un appareil de mesure de champ du type électro-optique.

Pour étalonner un appareil de mesure de champ se référant au potentiel du sol, le dispositif à prise médiane tel que représenté à la figure 3, page 43, est modifié de telle manière que la plaque inférieure du système de plaques parallèles est mise à la terre et sert de support à la sonde. Du fait que la distance accrue entre la sonde plate et la plaque supérieure réduit considérablement la perturbation, par la sonde, de la distribution de la charge superficielle sur la plaque supérieure, la distance entre plaques de 0,75 m indiquée précédemment pourra être réduite, augmentant de ce fait la région où le champ est pratiquement uniforme (voir figure 2, page 42, et tableau 1). La distance entre les plaques parallèles ne sera pas inférieure à 1,5 fois la dimension du côté de la sonde et le bord de la sonde sera éloigné de chacun des bords de la plaque inférieure d'au moins deux fois l'écartement entre les plaques. La distance entre les plaques parallèles et les plans mis à la terre les plus voisins (murs, planchers, etc.) sera supérieure à deux fois l'écartement entre les plaques. Il est recommandé que l'électrode de garde ait une largeur égale au moins à 6% de la dimension latérale de la sonde et que l'épaisseur de la sonde ne dépasse pas 3,5% de sa dimension latérale. Il est recommandé que le détecteur soit blindé et situé en dehors des plaques parallèles. Avec les limitations ci-dessus, l'écart entre le champ d'étalonnage et le champ uniforme de valeur U/d sera au plus de 0,5%.

5.3 Vérification de l'étalonnage par injection de courant

Si le rapport entre le courant induit et l'intensité du champ électrique I/E , pour un appareil de mesure de champ à potentiel flottant ou se référant au potentiel du sol, a été préalablement déterminé par l'étalonnage, un circuit à injection de courant peut être employé pour vérifier l'étalonnage de l'appareil de mesure, pourvu que ce dernier ait été vérifié la première fois immédiatement après son étalonnage. Un circuit tel que celui de la figure 4, page 43, peut être utilisé pour injecter un courant d'intensité connue entre les électrodes de la sonde de l'appareil de mesure de champ à potentiel flottant qui doit être vérifié. V est un voltmètre de précision et Z est une impédance donnée, d'un ordre de grandeur au moins deux fois supérieur à l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure. L'intensité du courant injecté peut être calculée à partir de la loi d'Ohm. Bien que des résistances ou des capacités puissent être employées comme impédances (figure 4), l'utilisation de résistances est recommandée. Les résistances sont préférables parce que l'admittance des capacités croît avec la fréquence. De ce fait, la présence d'harmoniques dans la source de tension peut conduire à des erreurs plus importantes que dans le cas d'emploi de résistances (annexe A, article A5).

calibrated has no diagonal dimension greater than 0.23 m. The distance between the plate edges and nearby ground planes (walls, floors, etc.) or objects should be at least 0.5 m. The dimensions of the parallel plates may be scaled upwards or downwards for calibration of larger or smaller field meters. Because electro-optic type probes have been made much smaller than free-body field meters, a scaled-down version of the parallel-plate system would be suitable for calibration of an electro-optic type field meter.

To calibrate a ground-reference type field meter, the centre-tapped arrangement shown in Figure 3, page 43, is changed to one in which the bottom plate of the parallel-plate structure is grounded and serves as a support for the probe. Because the increased distance between the flat probe and top plate greatly reduces perturbations of the surface charge distribution on the top plate due to the probe, the parallel-plate spacing indicated previously (0.75 m) can be reduced, thereby increasing the lateral extent of the nearly uniform field region (see Figure 2, page 42, and Table 1). The parallel-plate spacing should be no less than 1.5 times the side dimension of the probe and the edge 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 nearest ground planes (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 of the probe and the thickness of the probe should not exceed 3.5% of its side dimension. The detector should be shielded and located outside the parallel plates. With the above restrictions, the calibration field will be within 0.5% of the uniform field value, U/d .

5.3 *Current-injection calibration check*

If the ratio of induced current to electric field strength, I/E , for a free-body type or ground-reference type field meter has previously been determined by calibration, a current-injection circuit can be used for checking the calibration of the meter provided that it was first checked immediately after the calibration. A circuit such as that shown schematically in Figure 4, page 43, can be used to inject a known current into the probe sensing plates of a free-body type field meter which is being checked. V is a precision voltmeter and Z is a known impedance at least two orders of magnitude greater than the input impedance of the electric field meter. The injected current can thus be calculated from Ohm's law. Although resistors or capacitors may be used as the impedances shown in Figure 4, the use of resistors is recommended. Resistors are preferred because the admittance of capacitors increases with frequency. Therefore, the presence of harmonics in the voltage source can lead to greater errors than if resistors are used (Appendix A, Clause A5).

Un circuit semblable à celui représenté à la figure 4, page 43, peut être utilisé pour vérifier l'étalonnage d'un appareil de mesure de champ se référant au potentiel du sol. Dans ce cas, l'impédance côté mise à la terre du circuit est enlevée (figure 4) et la valeur de l'impédance restante est doublée.

Si la technique à injection de courant est utilisée, un blindage adéquat doit être mis en place en vue d'éliminer les signaux parasites émis par l'ambiance tels qu'éclairage, câbles d'énergie ou alimentations voisines. Si un blindage suffisant ne peut pas être obtenu facilement du fait de la conception de l'appareil de mesure de champ, une indication de l'amplitude des champs d'interférence ambiants peut être obtenue par l'une ou l'autre des deux techniques suivantes. Dans la première, la phase entre le signal injecté et le signal d'interférence est modifiée en inversant les connexions de liaison aux électrodes dans le cas d'un appareil de mesure à potentiel flottant, ou en inversant les connexions de la source d'alimentation dans le cas d'un appareil de mesure se référant au potentiel du sol. Si l'intensité du courant injecté conduisant à une lecture donnée est la même pour les deux configurations, le niveau de l'interférence peut être estimé négligeable. Si une petite différence existe, la moyenne des deux lectures est celle qui donnerait les mêmes lectures de l'appareil de mesure en l'absence d'interférence. Dans la seconde technique, la source de tension de la figure 4 est remplacée par un court-circuit et l'appareil indiquera alors l'amplitude de l'interférence. En général, il est recommandé que les signaux parasites soient limités à moins de 3% de l'intensité maximale du champ à mesurer et à moins de 1% dans les situations qui nécessitent une grande précision. Pour atteindre ces niveaux, il peut s'avérer nécessaire, soit d'améliorer le blindage des conducteurs reliés à la source de courant, soit d'effectuer la vérification de l'étalonnage en un endroit plus éloigné de la source d'interférence.

La validité des procédures de vérification décrites est fondée sur l'hypothèse que la géométrie de l'appareil de mesure de champ n'a pas été modifiée depuis son étalonnage dans un champ uniforme.

Si des connexions électriques peuvent être réalisées vers les électrodes optiquement transparentes de l'appareil de mesure du type électro-optique (paragraphe 4.4), une source de tension sera utilisée pour vérifier l'étalonnage d'un tel type d'appareil si celui-ci a été préalablement étalonné dans un champ uniforme. Le circuit sera semblable à celui de la figure 4, les impédances étant enlevées.

6. Procédure d'étalonnage

L'appareil de mesure du champ électrique doit être étalonné dans un champ électrique pratiquement uniforme produit à l'aide de plaques parallèles, tel que décrit au paragraphe 5.2. Si l'indication de l'appareil de mesure de champ dépend de la fréquence, la fréquence de la source utilisée pour l'étalonnage doit être la même que celle du champ à mesurer.

Le tracé de l'intensité du champ électrique calculée en fonction de la tension appliquée doit être effectué comme indiqué à la figure 5, page 44, où une zone de $\pm 5\%$ d'erreur est représentée. L'imprécision sur la mesure de la tension appliquée ne doit pas dépasser 0,5%. La valeur maximale de l'intensité du champ électrique doit se produire

A circuit similar to that shown in Figure 4, page 43, may be used for checking the calibration of a ground-reference type field meter. For this case, the impedance on the ground side of the circuit (Figure 4) is removed and the remaining impedance is doubled in value.

If current injection is used, adequate shielding should be employed to eliminate signal contributions from such ambient sources as interior lighting, power cables, or nearby power supplies. If sufficient shielding cannot readily be achieved because of the field meter design, an indication of the magnitude of interfering ambient fields may be obtained by either of two procedures. In the first, the phase relationship between the injected and interfering signals is altered by interchanging the lead connections to the sensing plates of a free-body meter, or by reversing connections to the power supply for a ground-reference meter. If the injected current required for a given meter reading is the same for the two configurations, the interfering signal may be regarded as negligible. If a small difference exists, the average of the two readings is that which would be required for the same meter readings in the absence of interference. In the second procedure, the voltage source in Figure 4 is replaced by a short circuit and the instrument will then indicate the magnitude of the interference signal. In general, interference signals should be limited to less than 3% of the maximum field strength to be measured and less than 1% in situations where higher accuracy is required. In order to achieve the above levels, it may be necessary either to improve the shielding of the current injection leads, or, alternatively, to perform the calibration check at a location more remote from the source of the interference.

The validity of the checking procedures described above rests on the assumption that the geometry of the field meter probe has not been altered since its calibration in a uniform field.

If electrical connections can be made to the optically-transparent electrodes of the electro-optic type field meter (Sub-clause 4.4), a voltage source can be used for checking the calibration of such a field meter if it has been previously calibrated in a uniform field. The circuit would be similar to that shown in Figure 4, but with the impedances removed.

6. Calibration procedure

The electric field meter shall be calibrated in a nearly uniform electric field produced with parallel plates as described in Sub-clause 5.2. If the field meter reading is frequency-dependent, the frequency of the source used for calibration shall be the same as that of the field to be measured.

A plot of calculated electric field strength versus applied voltage shall be made as indicated in Figure 5, page 44, where an error in the region of $\pm 5\%$ is indicated. The measurement uncertainty of the applied voltage shall not exceed 0.5%. The maximum measured electric field strength shall occur when the meter axis is rotated to within 10°

lorsque l'axe de l'appareil de mesure a une inclinaison inférieure à 10° par rapport à la verticale, et l'écart entre cette valeur maximale et la valeur calculée doit être inférieur à 5%. Les valeurs mesurées de l'intensité maximale du champ électrique ainsi obtenues doivent également être indiquées sur le graphique. Au moins trois points d'étalonnage, régulièrement répartis dans la zone comprise entre 33% et 100% de la pleine échelle, doivent être obtenus pour chaque gamme dans laquelle l'appareil de mesure de champ électrique sera utilisé. Les appareils de mesure de champ dont les lectures ne satisfont pas les critères ci-dessus doivent être considérés comme non conformes à la présente norme.

Il est commode de réaliser la vérification de l'étalonnage au même moment que l'étalonnage complet et, par la suite, les vérifications de l'étalonnage peuvent se substituer aux étalonnages avec un champ uniforme si un dispositif à plaques parallèles n'est pas disponible. Pour s'assurer d'effectuer des mesures valables de l'intensité du champ, des vérifications de l'étalonnage (ou des étalonnages) doivent être effectuées préalablement à toute campagne de mesures et en tout cas au minimum de façon journalière pendant une telle campagne. Les alimentations retenues pour les étalonnages et les vérifications d'étalonnage doivent être pratiquement exemptes d'harmoniques ($<1\%$). Dans le cas où une telle alimentation n'est pas disponible, l'imprécision sur la mesure résultant de la présence d'harmoniques doit être quantifiée et indiquée.

7. Mesures de l'intensité du champ électrique

7.1 Généralités

Deux exemples sont examinés en vue de fournir un guide pour la mesure des champs électriques à fréquence industrielle: mesures de l'intensité du champ à proximité d'une ligne de transport à haute tension et près d'une configuration sphère-plan. Les procédures de mesure dans le cas sphère-plan peuvent être appliquées dans de nombreuses situations pratiques où la géométrie du champ n'est pas bien définie, par exemple dans un poste. Ces deux exemples ont été choisis parce que les effets de proximité de l'observateur, qui peuvent entraîner des erreurs de mesure, sont très différents. D'autres sources d'erreurs sont décrites ci-après ainsi que dans l'annexe A.

7.2 Lignes de transport triphasées

En général, le vecteur champ électrique produit par une ligne de transport triphasée tourne dans l'espace et y décrit une ellipse (paragraphe 3.3). Cependant, au niveau du sol, l'ellipse devient une droite perpendiculaire au plan du sol. Sous les conducteurs, entre 0 m et 2 m au-dessus du niveau du sol, la composante verticale du champ électrique, dont la valeur change avec la localisation horizontale, varie peu avec la hauteur; la composante horizontale du champ électrique est petite sous les conducteurs mais peut devenir importante quand on s'éloigne de la ligne. Sous certaines précautions, les mesures peuvent être effectuées pour la plupart des points de cette région sans erreur significative résultant de perturbations dans les distributions des charges superficielles à la surface du sol et sur des objets voisins, produites par la présence de la sonde et de l'observateur.

relative to the vertical, and this maximum value shall be within $\pm 5\%$ of the calculated magnitude. Measured values of the maximum electric field strength obtained in this manner shall also be plotted. At least three calibration points evenly distributed over the range from 33% to 100% of full scale shall be obtained for each range of the electric field meter that will be used. Field meters with readings that fail to satisfy both of the above criteria shall be considered not in compliance with this standard.

It is convenient to perform the calibration check at the same time as the full calibration and, subsequently, calibration checks may be substituted for calibrations with a uniform field if a parallel-plate arrangement is not available. To ensure acquisition of valid field strength measurements, calibration checks (or calibrations) shall be made prior to any series of measurements and in any case at least daily during such a series. Energizing power supplies used for calibrations and calibration checks shall be nearly free ($\leq 1\%$) of harmonic content. In the event that such a power supply is not available, the measurement uncertainty caused by the presence of harmonics shall be quantified and reported.

7. Field strength measurements

7.1 General

In order to provide guidance for measurement of power-frequency electric fields, two examples are considered: field strength measurements in the vicinity of a high-voltage transmission line and field strength measurements near a sphere/plane electrode system. The measurement procedures for the sphere/plane electrode case can be used in many practical situations where the field geometry is not well defined as, for example, in a substation. These two examples have been chosen because the proximity effects of the observer, which can cause measurement errors, are significantly different. Other sources of measurement error are identified below as well as in Appendix A.

7.2 Three-phase transmission lines

In general, the electric field vector of a three-phase transmission line rotates in space where it describes an ellipse (Sub-clause 3.3). However, at ground level the ellipse becomes a line that is perpendicular to the ground. Beneath the conductors between 0 m and 2 m above the ground the vertical component of the electric field, which changes with horizontal position, varies little with height; the horizontal component of the field is small beneath the conductors but may become significant with increased lateral distance from the conductors. With certain precautions, measurements can be performed at most points in this region without significant error due to perturbed surface charge distributions on the ground plane and nearby objects caused by the presence of the probe and the observer.

Lorsqu'on effectue des mesures au-dessus du niveau du sol, il est recommandé d'indiquer la hauteur. Il convient d'orienter la sonde de façon à mesurer la composante verticale de l'intensité du champ parce que cette grandeur est utilisée pour caractériser les effets de l'induction sur les objets voisins du sol. A des hauteurs supérieures à ≈ 2 m au-dessus du sol, des mesures de l'intensité maximale du champ (voir ci-dessous) peuvent être importantes pour le calcul des effets de l'induction. Pour chaque situation, il y a lieu de noter la distance entre l'observateur et l'appareil de mesure ainsi que la taille de l'observateur. Les mesures réalisées avec une sonde à potentiel flottant ou une sonde électro-optique ne peuvent pas être faites à une hauteur au-dessus du sol (mesurée à partir du centre de la sonde) inférieure à deux fois la plus grande dimension diagonale de la sonde, sans une interaction importante entre la sonde et le sol. La distance entre l'appareil de mesure de champ et l'observateur sera suffisante pour réduire l'effet de proximité de l'observateur à moins de 3%. Cette distance dépendra de la hauteur de la sonde par rapport au sol et de la taille de l'observateur. La figure 6, page 44, indique la perturbation, dans un champ pratiquement uniforme, à l'endroit de la sonde, produite par un observateur de 1,8 m au potentiel du sol (debout, bras le long du corps) et pour une sonde placée à 1, 1,4, 1,6 et 1,8 m au-dessus du sol. Les valeurs théoriques pour un champ pratiquement uniforme sont représentées par les courbes en traits pleins et les valeurs mesurées obtenues sous une ligne de transport par des points. Par exemple, un effet de proximité de 3% se produit lorsque l'observateur est à environ 2 m de la sonde placée à 1,4 m au-dessus du sol. La perturbation effective du champ dépendra de la géométrie de l'ensemble observateur-appareil de mesure-ligne de transport.

Les mesures effectuées avec des hauteurs plus importantes de la sonde peuvent conduire à une réduction des effets de proximité dus à la présence de l'observateur (figure 6). Les effets de proximité indiqués par la figure 6 peuvent être considérés comme caractéristiques, étant donné que les observateurs sont normalement à un potentiel proche de celui du sol par suite de la résistance de fuite et de la capacité par rapport au sol. Il convient que l'observateur se tienne debout dans la région où le champ électrique est le plus petit en vue de réduire au minimum la perturbation du champ à l'endroit de la sonde (des mesures exploratoires peuvent se justifier pour localiser la région où le champ est minimal).

Des asymétries dans la conception d'une sonde à potentiel flottant peuvent modifier la direction de l'axe électrique par rapport à l'axe géométrique. Pour les mesures effectuées avec un tel appareil les effets de proximité indiqués par la figure 6 peuvent ne pas s'appliquer. Dans un tel cas, il convient d'évaluer les effets de proximité de l'observateur avant l'utilisation de l'appareil de mesure de champ et de noter ceux supérieurs à 3%. Une méthode est indiquée à cet effet par le paragraphe 7.4.

Pour fournir une description plus complète de l'intensité du champ en un point particulier, des mesures des champs maximal et minimal avec leurs orientations respectives peuvent être faites dans le plan de l'ellipse du champ. Dans les conditions idéales d'une ligne de transport horizontale et d'un sol plat sous la ligne, le plan de l'ellipse est perpendiculaire à la direction des conducteurs. C'est pratiquement le cas sous les lignes de transport en l'absence d'objets proches et de terrain très vallonné. Pour effectuer des mesures dans le plan de

When measurements above the ground plane are made, the height should be indicated. The probe should be oriented to measure the vertical field strength because this quantity is used to characterize induction effects in objects close to ground level. At heights greater than ≈ 2 m above the ground plane, measurements of the maximum field strength (see below) may be important for calculating induction effects. In all cases, the observer-to-instrument distance and the height of the observer should be noted. Measurements performed with a free-body or electro-optic type probe can be made down to a height above ground (as measured from probe centre) of two times its largest diagonal dimension without significant interaction between the probe and ground plane. The distance between the field meter and observer should be great enough to reduce the observer proximity effect to less than 3%. This distance will depend in part on the height of the probe and that of the observer. Figure 6, page 44, shows the perturbation of a nearly uniform electric field at the location of the probe for a grounded observer 1.8 m tall (standing, arms at side) and for probe heights of 1, 1.4, 1.6 and 1.8 m. Theoretical values for a nearly uniform field are given by the solid curves and measured values obtained under a transmission line are indicated by the data points. For example, a 3% proximity effect occurs when the observer distance is approximately 2 m from the probe positioned 1.4 m above the ground plane. The actual field perturbation will depend on the geometry of the observer/meter/transmission line combination.

Measurements performed at greater probe heights may lead to smaller observer proximity effects (Figure 6). As the observer's potential is normally near zero due to leakage resistance and capacitance to ground, the proximity effects indicated in Figure 6 can be regarded as typical. The observer should stand in the region of lowest electric field strength to minimize perturbation of the field at the location of the probe. (Exploratory measurements may be required to locate the region of lowest field.)

Asymmetries in the design of the free-body type field probe can change the direction of the electrical axis with respect to the geometric axis. For measurements performed with such an instrument, the proximity effects indicated in Figure 6 may not apply. In such a case, the observer proximity effects should be evaluated before the field meter is employed for measurements. A procedure for this purpose is given in Sub-clause 7.4. Proximity effects in excess of 3% should be reported.

To provide for a more complete description of the field strength at a point of interest, measurements can be made of the maximum and minimum fields with their respective orientations, in the plane of the field ellipse. Under the idealized conditions of horizontal transmission lines and a flat ground surface below, the plane of the ellipse is perpendicular to the direction of the conductors. This is approximately the case under transmission lines in the absence of nearby objects and of very rough terrain. To perform measurements in the plane of the

l'ellipse, il convient que la droite observateur-appareil de mesure soit parallèle aux conducteurs. La rotation de l'appareil autour de cette ligne, qui coïncide avec la perche, permettra de déterminer les composantes maximale et minimale du champ ainsi que leurs directions respectives. Si l'axe électrique de la sonde ne coïncide pas avec son axe géométrique, un alignement correct doit être réalisé pendant cette mesure.

Il est préférable que l'endroit où la mesure est effectuée soit relativement plat et exempt d'objets sources d'interférences. Les objets qui ne peuvent être déplacés sont répertoriés en indiquant leurs dimensions et localisation. Des mesures additionnelles à différentes distances de l'objet sont alors effectuées. Il est conseillé que la distance entre la sonde et les objets permanents (végétation comprise) soit au moins égale à deux fois la dimension maximale de la sonde pour s'assurer qu'il n'y a pas d'interaction importante entre la sonde et la distribution de la charge superficielle sur l'objet. (Bien que la distribution superficielle de la charge soit affectée par la présence de la sonde, la perturbation du champ à l'emplacement de celle-ci, à cause de la perturbation de la distribution de charge, sera négligeable).

Lorsque des sondes avec indicateurs à distance sont utilisées pour des mesures de l'intensité du champ sous une ligne de transport, l'effet de proximité de l'observateur est éliminé facilement en mesurant le signal du détecteur en un endroit éloigné de la sonde. Il est rappelé que la sonde se référant au potentiel du sol peut être utilisée seulement sur un sol plan (paragraphe 4.3).

7.3 Configuration sphère-plan

La détermination de l'intensité du champ électrique à proximité d'une configuration sphère-plan est considérée comme un second type de mesure parce que, de même que dans le cas de la ligne de transport, la sonde et l'observateur peuvent modifier de façon significative les distributions superficielles des charges, aussi bien sur le conducteur sous tension qui produit le champ que sur le plan de sol et les objets voisins. Bien que le champ soit moins uniforme que dans le voisinage d'une ligne de transport, les mesures réalisées avec des sondes étalonnées dans un champ uniforme peuvent être obtenues avec une bonne précision (annexe A, article A8). Les distances admissibles entre la sonde et les électrodes, de même qu'entre l'observateur et les électrodes, dépendront aussi bien de la dimension de la sphère que de la distance entre la sphère et les électrodes planes. Pendant la réalisation des mesures, il est recommandé de respecter les règles de sécurité correspondant au travail à proximité d'équipements à haute tension.

Une sonde se référant au potentiel du sol est appropriée pour mesurer l'intensité du champ au niveau du sol, du fait que l'observateur peut surveiller l'indicateur en un endroit écarté des électrodes et que la sonde, en général, ne perturbe que faiblement la distribution superficielle de la charge sur la sphère.

Les mesures réalisées au moyen d'une sonde à potentiel flottant ou d'une sonde électro-optique ne peuvent pas être faites à une hauteur au-dessus du sol (mesurée à partir du centre de la sonde) inférieure à deux fois la plus grande dimension diagonale de la sonde. Des essais avec des sondes à potentiel flottant ont montré que, dans les limites expérimentales de précision, des mesures précises de l'intensité du champ pourraient être réalisées lorsque la distance entre la surface de

ellipse, the observer/field meter line should be parallel to the conductors. Rotation of the meter about this line, which coincides with the handle, will permit the determination of the maximum and minimum field components and their directions. Alignment must be properly made during this measurement if the electrical axis of the probe does not coincide with its geometric axis.

The measurement area should be relatively flat and clear of interfering objects. Objects which cannot be removed should have their dimensions and location relative to the line recorded. Additional measurements at different distances from the object should be made. The distance between the probe and permanent objects (including vegetation) should be at least twice the largest diagonal probe dimension to ensure that there is no significant interaction between the probe and surface charge distribution on the object. (Although the surface charge distribution will be affected by the probe, the perturbation of the field at the location of the probe due to perturbation of the charge distribution will be negligible.)

When probes with remote display are used for field strength measurements near a transmission line, the observer proximity effect is readily eliminated by monitoring the detector signal at a location which is remote from the probe position. It should be recalled that the ground-reference type probe can only be used in the ground plane (Sub-clause 4.3).

7.3 *Sphere-plane configuration*

Determination of the electric field strength near a sphere-plane electrode system is considered as a second measurement case because, unlike the transmission line case, the field probe and observer can significantly perturb the surface charge distributions on the energized conductor which produces the field as well as on the ground plane and nearby objects. Although the field is less uniform than that in the vicinity of a transmission line, measurements performed with probes calibrated in a uniform field can be made with good accuracy (Appendix A, Clause A8). The permitted distances between the field probe and electrodes, as well as between the observer and electrodes, will depend in part on the sphere size and the spacing between the sphere and plane electrodes. When measurements are performed, the safety rules appropriate for working in the vicinity of high-voltage equipment should be observed.

A ground-reference type probe can readily be employed to measure the field strength at the ground plane because the observer can monitor the detector at a position far from the electrodes and the probe will, in general, not seriously disturb the surface charge distribution on the sphere.

Measurements performed with a free-body or electro-optic type probe can be made down to a height above the ground plane (as measured from probe centre) of twice the probe's largest diagonal dimension. Tests with free-body type probes have shown that, within experimental uncertainty, accurate field strength measurements can be made when the distance between the sphere electrode surface and probe centre is

l'électrode sphérique et le centre de la sonde diminuait jusqu'à quatre fois la plus grande dimension diagonale de la sonde, en l'absence d'effet couronne. La variation de l'intensité du champ pour des distances de l'ordre des dimensions de la sonde atteignait 30% et les imprécisions de mesure étaient inférieures à $\pm 3\%$ au cours de ces essais. Des considérations théoriques montrent que de plus faibles distances entre l'électrode et la sonde peuvent entraîner des erreurs de mesure qui ont pour origine la non-uniformité du champ (annexe A, article A8).

Comme dans le cas de la sonde se référant au potentiel du sol, l'effet de proximité de l'observateur peut être rendu négligeable si des appareils de mesure avec lecture à distance sont utilisés, du fait que l'observateur peut surveiller l'indicateur en un endroit éloigné des électrodes. L'effet de proximité de l'observateur n'est pas facilement prévisible si des sondes sans indicateurs à distance sont utilisées pour des mesures à proximité d'électrodes sphère-plan. Des mesures directes de cet effet sont décrites au paragraphe 7.4.

7.4 Détermination des effets de proximité

L'effet de proximité de l'observateur sur une mesure en un endroit donné de l'espace peut être déterminé expérimentalement en fixant la perche de la sonde sur une colonne verticale isolante comme schématisé à la figure 7, page 45. Des essais utilisant des colonnes en verre avec la disposition représentée ont montré que la présence de la colonne n'affectait pas la mesure d'une façon significative. L'effet de proximité est déterminé en notant les modifications dans la lecture de la valeur du champ en fonction de la distance entre l'observateur et la sonde. Il est conseillé de placer l'indicateur analogique ou numérique de l'appareil de mesure de telle sorte que l'observateur puisse le surveiller en sécurité pendant ces mesures. Cette technique de mesure pour la configuration sphère-plan peut aussi être utilisée pour les mesures de l'intensité du champ dans des cas pratiques où la géométrie du champ est plus compliquée; elle peut révéler, par exemple, si l'observateur s'est trouvé entre une électrode éloignée sous tension et l'appareil de mesure de champ. Lorsque des mesures de l'intensité du champ sont effectuées, il est recommandé de limiter les effets de proximité à moins de 3%.

8. Imprécisions dans la mesure de l'intensité du champ

La mesure de l'intensité du champ électrique à fréquence industrielle doit être effectuée de façon à éviter des interactions décelables entre la sonde et les électrodes qui génèrent le champ électrique. Les effets de proximité de l'observateur doivent être limités à moins de 3% en général et à moins de 1% dans les cas où une plus grande précision est souhaitée, par exemple, comparaisons entre valeurs calculées et mesurées de l'intensité du champ (figure 6, page 44, et paragraphes 7.2, 7.3 et 7.4). Au cours des mesures, l'observateur doit être conscient des différents paramètres qui peuvent introduire des erreurs dans la mesure et doit effectuer si nécessaire des essais pour s'assurer de leur validité comme indiqué à l'annexe A. Les imprécisions dues aux méthodes d'étalonnage et de mesure (article 6 et paragraphes 5.2, 5.3, 7.2, 7.3 et 7.4), et les paramètres répertoriés à l'annexe A (si nécessaire) doivent être ajoutés (racine carrée de la somme des carrés) et indiqués comme l'estimation de l'imprécision totale associée à une mesure donnée; en aucun cas l'imprécision ne doit dépasser $\pm 10\%$.

as small as four times the largest diagonal dimension of the probe in the absence of corona. The change in field strength over the dimensions of the probes was as large as 30% and the measurement uncertainties were less than $\pm 3\%$ during these tests. Theoretical considerations indicate that smaller distances between the electrode and field probe can lead to measurement errors due to non-uniformity of the field (Appendix A, Clause A8).

As in the case of the ground-reference type probe, the observer proximity effect can be made negligible when field strength meters with remote displays are used for measurements because the observer can monitor the detector at a location far from the electrodes. The observer proximity effect is not readily predictable when probes without remote displays are used for measurements near sphere/plane electrodes. Direct measurement of this effect is described in Sub-clause 7.4.

7.4 *Determination of proximity effects*

The effect of observer proximity on the measurement at a given point in space can be determined experimentally by supporting the field probe handle on a vertical insulating column as shown schematically in Figure 7, page 45. Tests employing glass columns with this geometry have shown that the presence of the column does not significantly affect the measurement. The proximity effect is determined by noting changes in the value of the field reading as a function of observer distance from the probe. The meter's digital or analogue display should be so arranged that the observer is able to view it safely during these measurements. This measurement technique for the sphere-plane electrode system can also be used for field strength measurements in practical situations where the field geometry is more complicated; it could possibly reveal, for example, if the observer had come between a distant energized electrode and the field meter. When field strength measurements are performed, observer proximity effects should be kept to less than 3%.

8. Field strength measurement uncertainties

Measurement of power-frequency electric field strength shall be performed in a manner which avoids detectable interaction between the probe and electrodes which generate the electric field. Observer proximity effects shall be limited to less than 3% in general and less than 1% (Figure 6, page 44, and Sub-clauses 7.2, 7.3 and 7.4) in situations where higher accuracy is desired, for example, comparisons between calculated and measured field strength values. During field strength measurements, the observer shall be aware of the various parameters which can introduce measurement errors and perform tests where appropriate to ascertain their significance as described in Appendix A. Uncertainties due to calibration and measurement procedures (Clause 6 and Sub-clauses 5.2, 5.3, 7.2, 7.3 and 7.4) and the parameters listed in Appendix A (where appropriate) shall be summed (square root of sum of the squares) and reported as the total estimated uncertainty associated with a given measurement; in any case the uncertainty shall not exceed $\pm 10\%$.

ANNEXE A

PARAMETRES QUI AFFECTENT LA PRECISION DES MESURES DE L'INTENSITE DU CHAMP

L'imprécision sur la mesure au cours des campagnes de mesures pratiquées à l'extérieur au moyen d'appareils de mesure à potentiel flottant disponibles dans le commerce est typiquement de l'ordre de 10% bien que cette valeur puisse être diminuée si on opère en suivant une procédure plus stricte. Les causes habituelles des principales erreurs sont la difficulté de définir la position de l'appareil, les erreurs de lecture, les effets de la température et de l'humidité, les effets de proximité de l'observateur, les interactions entre la sonde et les électrodes qui génèrent le champ (paragraphe 7.2, 7.3 et 7.4) et, dans certains cas, les courants de fuite le long de la perche de tenue. La présence d'un résidu harmonique important dans le champ introduira une certaine erreur dans l'indication d'un appareil de mesure du champ sensible au courant (équation (2)). L'influence de plusieurs des paramètres ci-dessus est discutée ci-après, avec des recommandations relatives aux différents procédés de vérification, dont certains sont effectués en laboratoire, d'autres sur place.

A1. Fuite de la perche de tenue

Les propriétés diélectriques de la perche de tenue de la sonde peuvent être dégradées par une pollution de surface ou par l'humidité. Un courant de fuite, via l'observateur se trouvant au potentiel de la terre, par suite d'une pollution de la perche peut entraîner une indication incorrecte de l'appareil de mesure. Une telle indication, exprimée en pourcentage du champ maximal, représentera un ordre de grandeur de l'erreur qui peut être produite par ce mécanisme. En vue de vérifier le courant de fuite de la perche pendant des mesures de champ sous une ligne de transport, il convient d'orienter l'appareil de mesure de champ électrique avec son axe géométrique perpendiculaire au plan de l'ellipse décrite par le champ électrique (paragraphe 7.2), ce qui conduira à une mesure d'intensité du champ électrique nulle, dans des conditions idéales. Dans le cas de mesures d'un champ monophasé, une vérification du courant de fuite de la perche peut être réalisée moyennant quelques mesures préliminaires pour localiser la direction du champ maximal. Une mesure est ensuite effectuée après avoir tourné l'axe géométrique de l'appareil de 90°. Dans cette position, toute déviation par rapport au zéro peut indiquer une erreur produite par un courant de fuite de la perche (voir cependant l'article A7). Il est supposé que pour ces vérifications du courant de fuite, l'axe électrique et l'axe géométrique de la sonde coïncident. Il est à noter que les sondes qui ont des électrodes actives asymétriques peuvent ne pas avoir leurs axes électrique et géométrique en coïncidence.

A2. Support isolant

Les perches isolantes qui sont utilisées pendant les mesures d'intensité de champ sont de préférence également utilisées pour tenir la sonde pendant l'étalonnage (paragraphe 5.2 et article 6). S'il s'avère nécessaire d'effectuer une mesure avec l'observateur éloigné de

APPENDIX A

PARAMETERS AFFECTING ACCURACY OF
FIELD STRENGTH MEASUREMENTS

The measurement uncertainty during practical outdoor measurements using commercially available free-body meters is typically near 10%, although this figure can be reduced under more controlled conditions. The most likely sources of major error are difficulty in positioning the meter, reading errors, temperature and humidity effects, observer proximity effects, interactions between probe and field-generating electrodes (Sub-clauses 7.2, 7.3 and 7.4) and, in some cases, leakage currents along the support handle. The presence of significant harmonic content in the field will introduce some error in the indication of current-sensing field meters (Equation (2)). The influence of several of the above parameters is discussed below with guidance given regarding various checking procedures, some of which can be performed in the laboratory, others on site.

A1. Handle leakage

The dielectric properties of a field probe handle may be degraded by surface contamination or humidity. Electrical leakage through a grounded observer due to surface contamination on the handle may cause an invalid indication on the meter. Such an indication, expressed as a percentage of the maximum field would represent the order of magnitude of the error that could be caused by this mechanism. To check for handle leakage during measurements of transmission line fields, the electric field meter should be oriented with its geometrical axis perpendicular to the plane of the electric field ellipse (Sub-clause 7.2) where, under ideal conditions, zero electric field strength should be measured. In the case of the single-phase field measurements a check for handle leakage can be performed by making some preliminary measurements to locate the direction of the maximum field. A measurement should then be performed with the instrument axis rotated through 90°. Any deviation from zero in this position may indicate an error due to handle leakage (however, see Clause A7). It is assumed during these leakage checks that the probe's electrical axis is coincident with its geometrical axis. It should be noted that probes with asymmetrical sensing electrodes may have electrical and geometrical axes that fail to coincide.

A2. Insulating support

Insulating handles that are used during field strength measurements should also be used to support the probe during calibration (Sub-clause 5.2 and Clause 6). If it is necessary to perform a measurement with the observer located far from the measurement location, the

l'endroit de la mesure, la disposition indiquée à la figure 7, page 45, sera retenue. L'appareil de mesure du champ ne sera pas placé directement au sommet d'une colonne verticale isolante (par exemple pour éviter d'utiliser la perche). Cette disposition peut entraîner une erreur de mesure significative.

A3. Humidité

Bien que le boîtier de l'appareil soit étanche, un film de condensation superficielle se formera en cas de forte humidité et il pourra en résulter un courant de fuite significatif entre les deux électrodes actives de l'appareil de mesure de champ, court-circuitant partiellement le circuit interne de mesure. Pour cette raison, des précautions sont nécessaires lorsque des mesures sont réalisées dans une humidité relative supérieure à 80%. Il est recommandé de maintenir propres et secs l'appareil de mesure de champ, son isolation interne et la perche de tenue, pour minimiser les courants de fuite et les erreurs de mesure en résultant. L'influence de l'humidité ambiante sur les caractéristiques de l'appareil de mesure de champ peut être déterminée en utilisant la technique par injection de courant (paragraphe 5.3) alors que l'appareil de mesure de champ est dans une chambre climatique. En relevant la réponse de l'appareil de mesure de champ en fonction du taux d'humidité, le courant (ou la tension) injecté étant maintenu constant, il sera possible de déterminer l'influence de l'humidité.

A4. Température

Des essais en chambre climatique d'appareils de mesure de champ à potentiel flottant, disponibles commercialement avec indicateurs analogiques, ont montré que l'influence de la température pouvait affecter les indications des appareils de près de 8% pour une augmentation de la température de 0 °C à 40 °C. Si la température lors de l'étalonnage est sensiblement différente de la température au moment des mesures d'intensité de champ, il convient de noter cette différence. Si possible, l'influence de la température sur l'appareil de mesure de champ sera déterminée et une correction de température sera apportée quand elle sera estimée suffisamment importante.

La sensibilité des sondes de type électro-optique à l'intensité du champ est également influencée par les variations de température. Des essais sur l'effet Pockels des cristaux de $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_2$ ont indiqué des variations de sensibilité de moins de 4% pour la gamme de température entre 0 °C et 40 °C. Cependant, on peut noter que d'autres cristaux diélectriques sont connus pour avoir des coefficients de température supérieurs à celui du $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_2$ et peuvent nécessiter une correction de température.

Comme pour l'influence de l'humidité (article A3), l'effet de la température sur les performances de l'appareil de mesure de champ peut être déterminé en utilisant la technique par injection de courant et une chambre climatique.

arrangement shown in Figure 7, page 45, should be used. The field meter should not be put directly on top of a vertical insulating column (for example, to avoid use of the handle). This arrangement can lead to significant measurement error.

A3. Humidity

However watertight the instrument housing, a layer of surface condensation will form in high humidities which may result in a significant leakage current between the two sensing electrodes of the field meter, partially short-circuiting the internal measuring circuit. For this reason, caution is needed in making measurements when the relative humidity exceeds 80%. The field meter, its internal insulation, and handle should be kept in a clean and dry condition in order to minimize leakage currents and any resulting measurement errors. The influence of ambient humidity on the performance of the field meter can be determined using the current-injection technique (Sub-clause 5.3) while the field meter is in an environmental chamber. By monitoring the field meter response as a function of humidity under conditions of constant current (voltage) injection, the dependence on humidity can be determined.

A4. Temperature

Environmental chamber tests of commercial free-body type field meters with analogue displays have shown that the influence of temperature can affect the instrument indication by as much as 8% as the temperature is increased from 0 °C to 40 °C. If the calibration temperature is significantly different from the temperature at the time of field strength measurements, the difference should be reported. If possible, the temperature dependence of a field meter should be determined and field strength measurements should be corrected for temperature when considered important.

The sensitivity of electro-optic type probes to field strength is also influenced by changes in temperature. Tests of the Pockels effect with $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals have shown sensitivity changes of less than 4% for the temperature range of 0 °C to 40 °C. However, it should be noted that other dielectric crystals are known to have greater temperature coefficients than $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and thus may require correction for temperature.

As with the influence of humidity (Clause A3), the effect of temperature on the performance of a field meter can be determined using the current injection technique and an environmental chamber.

A5. Résidu harmonique

Si le détecteur de l'appareil de mesure de champ mesure un courant (équations (2) et (4)) pour déterminer l'intensité du champ, la présence d'harmoniques dans le champ peut introduire une erreur de mesure parce que les courants dus aux harmoniques sont pondérés par le rang des harmoniques. L'erreur globale dépendra de la conception du détecteur (par exemple: filtre, valeur efficace, valeur moyenne efficace). Il est à noter qu'un détecteur qui mesure la charge pour déterminer l'intensité du champ (équations (1) et (3)) ne pondère pas par excès les composantes harmoniques du signal induit.

Si possible, la forme d'onde du champ est observée afin d'obtenir une estimation de l'importance du résidu harmonique. Une observation qualitative peut être réalisée à l'aide d'un oscilloscope et d'un détecteur sensible à la charge raccordé à une sonde dipôle placée dans le champ électrique. En variante, un appareil de mesure se référant au potentiel du sol avec un détecteur sensible à la charge peut être utilisé au lieu de la sonde dipôle. L'utilisation d'un analyseur d'onde à la place de l'oscilloscope permet la mesure, en pourcentage, des différentes composantes harmoniques. Le résidu harmonique des tensions d'une ligne de transport peut être élevé (par exemple, au voisinage de charges industrielles importantes).

A6. Champs magnétiques ambiants

Les champs magnétiques étant produits conjointement aux champs électriques à fréquence industrielle, il est souhaitable que les appareils de mesure du champ électrique soient insensibles à leurs effets. La sensibilité à un champ magnétique alternatif d'un appareil de mesure du champ électrique peut être évaluée en installant la sonde et le détecteur dans une région où l'induction magnétique a une amplitude comparable à celle qui est rencontrée dans les cas réels (par exemple: $< 0,5 \times 10^{-4}$ T pour les lignes de transport et $\approx 2 \times 10^{-7}$ T pour les champs ambiants). Des champs magnétiques à fréquence industrielle sont facilement produits à l'aide de bobines de Helmholtz ou d'un cadre avec un grand nombre de spires.

A7. Inclinaison de l'appareil de mesure

Un déséquilibre mécanique de l'équipage mobile de l'indicateur analogique de l'appareil de mesure de champ peut être une source d'erreur de mesure. Si l'équipage mobile n'est pas suffisamment équilibré, il est recommandé d'utiliser l'appareil de mesure de champ avec la même orientation par rapport à la verticale que celle qui existait au moment de l'étalonnage. Une estimation de l'ordre de grandeur de cette source d'erreur de mesure peut être obtenue en faisant tourner l'appareil de mesure de champ en l'absence de champ électrique et en observant le déplacement de l'aiguille.

L'indication d'un appareil de mesure de champ à potentiel flottant équipé d'un indicateur analogique, pour un courant induit donné, peut dépendre de l'inclinaison de l'appareil de mesure même si celui-ci est mécaniquement équilibré. Cet effet peut être une source d'erreur de mesure si l'appareil de mesure de champ est utilisé avec une orien-

A5. Harmonic content

If the field meter detector measures current (Equations (2) and (4)) to determine the field strength, the presence of harmonics in the field can introduce a measurement error because the currents due to the harmonics will be weighted by their harmonic numbers. The amount of error will depend on the detector circuit design (for example, filter, r.m.s., average sensing r.m.s.). It should be noted that a detector which measures charge to determine field strength (Equations (1) and (3)) will not unduly weight the harmonic components of the induced signal.

If possible, the waveform of the field should be observed to obtain an estimate of the amount of harmonic content. A qualitative observation can be made with an oscilloscope and charge-sensing detector connected to a dipole probe in the electric field. Alternatively, a ground-reference type field meter with a charge-sensing detector could be used in place of the dipole probe. Replacement of the oscilloscope with a wave analyser would permit the measurement, in percent, of the various harmonic components. The harmonic content of power line voltages may be significant (for example, near large industrial loads).

A6. Ambient magnetic fields

Because magnetic fields are produced simultaneously with power-frequency electric fields, electric field meters should be immune to their presence. The sensitivity of an electric field meter to an a.c. magnetic field can be determined by placing the field probe and detector in a region where the magnetic flux density is comparable in magnitude to that which may be encountered in a measurement situation (for example, $< 0.5 \times 10^{-4}$ T for transmission lines and $\approx 2 \times 10^{-7}$ T for ambient fields). Power frequency magnetic fields are readily produced with Helmholtz coils or a wire loop of many turns.

A7. Instrument inclination

Mechanical imbalance of the movement of an analogue field meter can be a source of measurement error. If the movement is not sufficiently well-balanced, the field meter should be used in the same orientation with respect to the vertical as existed during calibration. An estimate of the magnitude of this source of measurement error can be made by rotating the field meter in the absence of an electric field and observing the displacement of the needle.

The indication of the free-body field meter with an analogue display to a given induced current may depend on the meter's inclination even if the meter is mechanically balanced. This effect can be a source of measurement error if the field meter is used in an orientation that

tation différente de celle qui existait au moment de l'étalonnage dans un champ uniforme. L'amplitude de cette erreur éventuelle peut être déterminée en utilisant la technique par injection de courant tandis que l'on tourne l'appareil de mesure de champ en l'absence de champ électrique.

De par sa conception, un appareil de mesure de champ équipé de deux électrodes actives symétriques mesure la composante du champ qui est parallèle à son axe principal, (voir figures 1a, 1b, et 1c, page 41). Pour mesurer l'intensité maximale du champ électrique en un point de l'espace, l'appareil doit être orienté de telle manière que la déviation maximale soit obtenue sur l'indicateur. La valeur maximale du champ est ainsi mesurée et son orientation peut être également déterminée.

Si les mesures sont faites dans le plan de l'ellipse décrite par le champ (paragraphe 7.2), la direction sera celle de l'axe principal de l'ellipse. L'orientation correspondant à la valeur minimale de l'intensité du champ dans le plan de l'ellipse permettra de déterminer la direction de l'axe secondaire.

Les mesures de l'intensité du champ au moyen d'une sonde à plaques parallèles ayant des électrodes carrées ou rectangulaires (figure 1c), présentant un écart de symétrie par rapport à leur axe principal, peuvent varier en fonction de l'angle de rotation par rapport à l'axe principal s'il y a une composante du champ perpendiculaire à cet axe. Par exemple, les mesures de la composante verticale de l'intensité du champ électrique, en présence d'une composante horizontale du champ électrique importante, peuvent varier si la sonde est tournée autour de son axe vertical. La différence entre les valeurs maximale et minimale, exprimée par rapport à la composante horizontale du champ électrique, donnera une indication de la contribution possible (erreur) à la mesure de l'intensité du champ provenant de la composante perpendiculaire au champ mesuré. Les sondes à plaques parallèles mais à symétrie cylindrique autour de leur axe principal (disques) sont exemptes d'erreur de ce type.

A8. Champ non uniforme (divergence)

En général, la non-uniformité du champ électrique ne réduit pas de façon importante la précision de mesure parce que l'appareil est étalonné dans un champ uniforme. Cela peut être démontré en considérant le courant induit dans un dipôle sphérique situé dans un champ non uniforme généré par une charge ponctuelle $Q(\omega t)$. En l'absence de plans voisins mis à la terre, le courant est donné par:

$$I = 3\pi r^2 \omega \epsilon_0 E \left[(2/3a^2)(1 - (1 - a^2)(1 + a^2)^{-\frac{1}{2}}) \right] \quad (a.1)$$

ou approximativement

$$I = 3\pi r^2 \omega \epsilon_0 E \left[1 - (7/12)(a)^2 + (11/24)(a)^4 - \dots \right] \quad (a.2)$$

où:

$$E = Q(\omega t)/4\pi\epsilon_0 D^2$$

$$a = r/D$$

r est le rayon du dipôle sphérique

D est la distance entre la charge ponctuelle et le centre du dipôle

differs from that during calibration in a uniform field. The magnitude of this possible error can be determined using the current-injection technique while rotating the field meter in the absence of an electric field.

From its design, a field meter with symmetric sensing electrodes measures the field component which is parallel to its main axis (see Figures 1a, 1b and 1c, page 41). If it is intended to measure the maximum field strength at a point in space, the instrument must be orientated in such a way that the maximum deflection is obtained on the indicating instrument. The maximum value of the field is thus measured and its direction may be deduced.

If measurements are made in the plane of the field ellipse (Sub-clause 7.2), the direction will be that of the major axis of the ellipse. The orientation for the minimum value of the field strength in the plane of the ellipse will allow determination of the minor axis direction.

Field strength measurements obtained with a parallel-plate probe having square or rectangular sensing electrodes (Figure 1c), which lack symmetry about their main axis, may vary as a function of rotation angle about the main axis if there is an electric field component perpendicular to this axis. For example, measurements of the vertical electric field strength, in the presence of a large horizontal electric field component, may vary as the probe is rotated about the vertical axis. The difference between the maximum and minimum measurements, expressed as a fraction of the horizontal electric field strength, would give a measure of the possible contribution (error) to field strength measurement from a field component orthogonal to the field that is being measured. Parallel-plate probes with cylindrical symmetry about their main axis (discs) will be free from error due to this effect.

A8. Non-uniformity (divergence) of the field

Non-uniformity in the electric field will not, in general, substantially reduce the accuracy of a measurement because the instrument is calibrated in a uniform field. This is shown by considering the current induced in a spherical dipole located within the non-uniform field generated by a point charge $Q(\omega t)$. In the absence of nearby ground planes, the current is:

$$I = 3\pi r^2 \omega \epsilon_0 E \left[(2/3a^2)(1 - (1 - a^2)(1 + a^2)^{-\frac{1}{2}}) \right] \quad (\text{a.1})$$

or approximately

$$I = 3\pi r^2 \omega \epsilon_0 E \left[1 - (7/12)(a)^2 + (11/24)(a)^4 - \dots \right] \quad (\text{a.2})$$

where:

$$E = Q(\omega t)/4\pi \epsilon_0 D^2$$

$$a = r/D$$

r is radius of dipole

D is distance between point charge and centre of dipole.

Il est considéré ci-dessus que l'axe électrique de la sonde est parallèle à la direction du champ. L'équation relative au dipôle sphérique au paragraphe 4.2 indique que le courant induit est celui qui est produit dans un champ uniforme d'intensité $Q/4\pi\epsilon_0 D^2$ si les termes en r/D sont négligés. Ainsi, le courant induit entre les deux moitiés d'un dipôle sphérique, lorsqu'il est situé dans un champ uniforme, a pratiquement la même valeur que celui qu'on obtient quand le dipôle est placé dans un champ très divergent d'égale amplitude, en un point correspondant au centre du dipôle. Par exemple, la différence entre les courants induits par un champ uniforme et par le champ non uniforme produit par une charge ponctuelle est inférieure à 1% si $r/D \leq 0,1$; cependant la variation de l'intensité du champ électrique pour une variation de distance égale au diamètre de la sphère est de l'ordre de 40% dans le champ non uniforme en l'absence du dipôle, c'est-à-dire de $D-r$ à $D+r$ de la charge ponctuelle:

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

On peut montrer que l'erreur de mesure reste faible même lorsque l'axe de la sonde n'est pas dans l'alignement de la direction du champ. En conséquence, l'erreur ayant pour origine la divergence du champ est petite pour la plupart des mesures. Une analyse théorique montre que les sondes équipées de plaques parallèles (en lieu et place d'hémisphères) peuvent également être employées pour la mesure de champs divergents avec une erreur comparable si la différence entre les charges induites sur les plaques ou le courant induit est mesurée par le détecteur. En comparant avec l'équation ci-dessus, il est à noter que le rayon effectif ou équivalent des appareils de mesure de champ électrique disponibles dans le commerce, présentant une géométrie rectangulaire, peut être estimé égal à la moitié de la plus grande diagonale.