

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61000-4-20

Edition 1.1

2007-01

Edition 1:2003 consolidée par l'amendement 1:2006
Edition 1:2003 consolidated with amendment 1:2006

**PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM
BASIC EMC PUBLICATION**

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

**Partie 4-20:
Techniques d'essai et de mesure –
Essais d'émission et d'immunité
dans les guides d'onde TEM**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

**Part 4-20:
Testing and measurement techniques –
Emission and immunity testing in transverse
electromagnetic (TEM) waveguides**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61000-4-20:2003+A1:2006

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI** (www.iec.ch)
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/catlg-f.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/JP.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

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

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. 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 also available from the following:

- **IEC Web Site** (www.iec.ch)
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61000-4-20

Edition 1.1

2007-01

Edition 1:2003 consolidée par l'amendement 1:2006
Edition 1:2003 consolidated with amendment 1:2006

**PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM
BASIC EMC PUBLICATION**

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

**Partie 4-20:
Techniques d'essai et de mesure –
Essais d'émission et d'immunité
dans les guides d'onde TEM**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

**Part 4-20:
Testing and measurement techniques –
Emission and immunity testing in transverse
electromagnetic (TEM) waveguides**

© IEC 2007 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, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

CL

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	6
INTRODUCTION.....	10
1 Domaine d'application et objet.....	12
2 Références normatives.....	14
3 Définitions et abréviations	16
3.1 Définitions	16
3.2 Abréviations	22
4 Généralités.....	22
5 Exigences concernant les guides d'onde TEM	22
5.1 Exigences générales pour l'utilisation des guides d'onde TEM	24
5.2 Exigences spécifiques pour certains types de guides d'onde TEM.....	28
5.3 Considérations à propos de l'incertitude de mesure.....	30
6 Vue d'ensemble des types d'appareils en essai.....	30
6.1 Petit appareil en essai.....	30
6.2 Appareil en essai de grande taille.....	30
Annexe A (normative) Essais d'émission dans les guides d'onde TEM.....	32
Annexe B (normative) Essais d'immunité dans les guides d'onde TEM	76
Annexe C (normative) Essais de transitoires IEM-HA dans les guides d'onde TEM	92
Annexe D (informative) Caractérisation des guides d'onde TEM	108
Annexe E (informative) Normes contenant des guides d'onde TEM.....	122
Bibliographie.....	126
Figure A.1 – Disposition du câble de sortie au coin à l'ortho-angle et au bord inférieur du volume d'essai.....	56
Figure A.2 – Positionneur d'ortho-axe ou manipulateur de base.....	58
Figure A.3 – Trois positions de rotation d'axe orthogonal pour les mesures d'émission.....	60
Figure A.4 – Orientations canoniques à 12 faces/axes pour un appareil en essai typique.	62
Figure A.5 – Géométrie de l'emplacement d'essai en espace libre	64
Figure A.6 – Cellule TEM à deux accès (septum symétrique).....	66
Figure A.7 – Cellule TEM à un accès (septum asymétrique).....	68
Figure A.8 – Ligne ouverte (deux plaques).....	72
Figure A.9 – Ligne ouverte (quatre plaques, alimentation équilibrée)	74
Figure B.1 – Exemple de montage d'essai pour guides d'onde TEM à polarisation unique	88
Figure B.2 – Points d'étalonnage de la zone uniforme dans un guide d'onde TEM	90
Figure C.1 – Amplitude spectrale dans le domaine fréquentiel entre 100 kHz et 300 MHz... 106	

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	11
1 Scope and object.....	13
2 Normative references	15
3 Definitions and abbreviations.....	17
3.1 Definitions	17
3.2 Abbreviations	23
4 General	23
5 TEM waveguide requirements.....	23
5.1 General requirements for the use of TEM waveguides	25
5.2 Special requirements for certain types of TEM waveguides	29
5.3 Measurement uncertainty considerations.....	31
6 Overview of EUT types	31
6.1 Small EUT	31
6.2 Large EUT	31
Annex A (normative) Emission testing in TEM waveguides.....	33
Annex B (normative) Immunity testing in TEM waveguides.....	77
Annex C (normative) HEMP transient testing in TEM waveguides	93
Annex D (informative) TEM waveguide characterization.....	109
Annex E (informative) Standards including TEM waveguides	123
Bibliography.....	127
Figure A.1 – Routing the exit cable to the corner at the ortho-angle and the lower edge of the test volume	57
Figure A.2 – Basic ortho-axis positioner or manipulator	59
Figure A.3 – Three orthogonal axis-rotation positions for emission measurements.....	61
Figure A.4 – Canonical 12-face/axis orientations for a typical EUT.....	63
Figure A.5 – Open-area test site geometry.....	65
Figure A.6 – Two-port TEM cell (symmetric septum)	67
Figure A.7 – One-port TEM cell (asymmetric septum)	69
Figure A.8 – Stripline (two plates)	73
Figure A.9 – Stripline (four plates, balanced feeding).....	75
Figure B.1 – Example of test set-up for single-polarization TEM waveguides	89
Figure B.2 – Uniform area calibration points in TEM waveguide	91
Figure C.1 – Frequency domain spectral magnitude between 100 kHz and 300 MHz	107

Figure D.1 – Guide d'onde le plus simple (pas d'onde TEM !).	120
Figure D.2 – Guides d'onde pour propagation TEM.....	120
Figure D.3 – Vecteur polarisation.....	120
Figure D.4 – Modèle de ligne de transmission pour propagation TEM	120
Figure D.5 – Guides d'onde TEM à un ou deux accès.	120
 Tableau B.1 – Points d'étalonnage de la zone uniforme	 80
Tableau B.2 – Niveaux d'essai.....	82
Tableau C.1 – Niveaux d'essai d'immunité aux perturbations rayonnées définis dans la présente norme.....	106

Figure D.1 – Simplest waveguide (no TEM wave!)	121
Figure D.2 – Waveguides for TEM propagation	121
Figure D.3 – Polarization vector	121
Figure D.4 – Transmission line model for TEM propagation	121
Figure D.5 – One- and two-port TEM waveguides	121
Table B.1 – Uniform area calibration points.....	81
Table B.2 – Test levels	83
Table C.1 – Radiated immunity test levels defined in the present standard	107

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 4-20: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'émission et d'immunité dans les guides d'onde TEM

AVANT-PROPOS

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

La norme internationale CEI 61000-4-20 a été établie par le sous-comité A du CISPR: Mesures des perturbations radioélectriques et méthodes statistiques, avec la coopération du sous-comité 77B: Phénomènes haute fréquence, du comité d'études 77: Compatibilité électromagnétique.

Elle constitue la Partie 4-20 de la CEI 61000. Elle a le statut de publication fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de la CEI.

La présente version consolidée de la CEI 61000-4-20 comprend la première édition (2003) [documents CIS/A/419/FDIS et CIS/A/435/RVD] et son amendement 1 (2006) [documents 77B/520/FDIS et 77B/528/RVD].

Le contenu technique de cette version consolidée est donc identique à celui de l'édition de base et à son amendement; cette version a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

Elle porte le numéro d'édition 1.1.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –**Part 4-20: Testing and measurement techniques –
Emission and immunity testing in
transverse electromagnetic (TEM) waveguides**

FOREWORD

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

International Standard IEC 61000-4-20 has been prepared by CISPR subcommittee A: Radio interference measurements and statistical methods, in cooperation with subcommittee 77B: High-frequency phenomena, of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

This standard forms Part 4-20 of IEC 61000. It has the status of a basic EMC publication in accordance with IEC Guide 107.

This consolidated version of IEC 61000-4-20 consists of the first edition (2003) [documents CIS/A/419/FDIS and CIS/A/435/RVD] and its amendment 1 (2006) [documents 77B/520/FDIS and 77B/528/RVD].

The technical content is therefore identical to the base edition and its amendment and has been prepared for user convenience.

It bears the edition number 1.1.

Une ligne verticale dans la marge indique où la publication de base a été modifiée par l'amendement 1.

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

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

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

A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendment 1.

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

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

La CEI 61000 est publiée sous forme de plusieurs parties conformément à la structure suivante:

Partie 1: Généralités

Considérations générales (introduction, principes fondamentaux)

Définitions, terminologie

Partie 2: Environnement

Description de l'environnement

Classification de l'environnement

Niveaux de compatibilité

Partie 3: Limites

Limites d'émission

Limites d'immunité (dans la mesure où elles ne tombent pas sous la responsabilité des comités produits)

Partie 4: Techniques d'essai et de mesure

Techniques de mesure

Techniques d'essai

Partie 5: Directives d'installation et d'atténuation

Guide d'installation

Méthodes et dispositifs d'atténuation

Partie 6: Normes génériques

Partie 9: Divers

Chaque partie est ensuite subdivisée en plusieurs parties, publiées soit comme Normes internationales, soit comme spécifications techniques ou rapports techniques, dont certaines ont déjà été publiées en tant que sections. D'autres seront publiées avec le numéro de la partie suivi d'un tiret et complété d'un second chiffre identifiant la subdivision (exemple: 61000-6-1).

INTRODUCTION

IEC 61000 is published in separate parts according to the following structure:

Part 1: General

General considerations (introduction, fundamental principles)

Definitions, terminology

Part 2: Environment

Description of the environment

Classification of the environment

Compatibility levels

Part 3: Limits

Emission limits

Immunity limits (in so far as they do not fall under the responsibility of the product committees)

Part 4: Testing and measurement techniques

Measurement techniques

Testing techniques

Part 5: Installation and mitigation guidelines

Installation guidelines

Mitigation methods and devices

Part 6: Generic Standards

Part 9: Miscellaneous

Each part is further subdivided into several parts, published either as International Standards, Technical Specifications or Technical Reports, some of which have already been published as sections. Others will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision (example: 61000-6-1).

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 4-20: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'émission et d'immunité dans les guides d'onde TEM

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 61000 concerne les méthodes d'essai d'émission et d'immunité pour les équipements électriques et électroniques utilisant différents types de guides d'onde transverse électromagnétique (TEM). Ces types comprennent des structures ouvertes (par exemple, des lignes ouvertes et des simulateurs d'impulsion électromagnétique), et des structures fermées (par exemple des cellules TEM), qui peuvent être elles-mêmes classées en guides d'onde TEM à un accès, à deux accès, ou à accès multiples. La gamme de fréquences dépend des exigences d'essai spécifiques et du type spécifique de guide d'onde TEM.

L'objet de cette norme est de décrire

- les caractéristiques des guides d'onde TEM, y compris les gammes de fréquences types et les limites de tailles des appareils en essai;
- les méthodes de validation des guides d'onde TEM pour les mesures de CEM;
- la définition de l'appareil en essai (c'est-à-dire l'armoire et le câblage de l'appareil en essai);
- les montages d'essai, les procédures et les exigences pour les essais d'émissions rayonnées dans les lignes TEM, et
- les montages d'essai, les procédures et les exigences pour les essais d'immunité rayonnée dans les guides d'onde TEM.

NOTE Dans cette norme, les méthodes d'essai sont définies afin de mesurer les effets des rayonnements électromagnétiques sur les matériels et les émissions électromagnétiques venant des matériels concernés. La simulation et la mesure des rayonnements électromagnétiques ne sont pas suffisamment exactes pour une détermination quantitative des effets sur toutes les installations des utilisateurs finaux. Les méthodes d'essai définies sont structurées avec l'objectif premier d'établir une répétabilité adéquate des résultats en des installations d'essai variées pour des analyses qualitatives des effets.

Cette norme ne vise pas à spécifier les essais devant s'appliquer à des appareils ou systèmes particuliers. Le but principal de cette partie est de donner une référence de base d'ordre général à tous les comités de produits CEI concernés. Pour les essais d'émission rayonnée, il convient que les comités de produits sélectionnent des limites d'émission et des méthodes d'essai en consultation avec le CISPR. Pour les essais d'immunité rayonnée, les comités de produits restent responsables du choix approprié des essais d'immunité et des limites à appliquer aux matériels de leur domaine d'application. Cette norme décrit des méthodes d'essai qui sont indépendantes de celles de la CEI 61000-4-3. Ces autres méthodes distinctes peuvent être utilisées quand elles sont ainsi spécifiées par les comités de produits, en consultation avec le CISPR et le CE 77.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides

1 Scope and object

This part of IEC 61000 relates to emission and immunity test methods for electrical and electronic equipment using various types of transverse electromagnetic (TEM) waveguides. This includes open (for example, striplines and EMP simulators) and closed (for example, TEM cells) structures, which can be further classified as one-, two-, or multi-port TEM waveguides. The frequency range depends on the specific testing requirements and the specific TEM waveguide type.

The object of this standard is to describe

- TEM waveguide characteristics, including typical frequency ranges and EUT-size limitations;
- TEM waveguide validation methods for EMC measurements;
- the EUT (i.e. EUT cabinet and cabling) definition;
- test set-ups, procedures, and requirements for radiated emission testing in TEM waveguides and
- test set-ups, procedures, and requirements for radiated immunity testing in TEM waveguides.

NOTE Test methods are defined in this standard for measuring the effects of electromagnetic radiation on equipment and the electromagnetic emissions from equipment concerned. The simulation and measurement of electromagnetic radiation is not adequately exact for quantitative determination of effects for all end-use installations. The test methods defined are structured for a primary objective of establishing adequate repeatability of results at various test facilities for qualitative analysis of effects.

This standard does not intend to specify the tests to be applied to any particular apparatus or system(s). The main intention of this standard is to provide a general basic reference for all interested product committees of the IEC. For radiated emissions testing, product committees should select emission limits and test methods in consultation with CISPR. For radiated immunity testing, product committees remain responsible for the appropriate choice of immunity tests and immunity test limits to be applied to equipment within their scope. This standard describes test methods that are separate from those of IEC 61000-4-3. These other distinct test methods may be used when so specified by product committees, in consultation with CISPR and TC 77.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050(161), *Vocabulaire Électrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Première partie: Généralités et guide*

CEI 61000-2-11, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-11: Environnement – Classification de l'environnement IEMN-HA*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-4-23, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-23: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection pour perturbations IEMN-HA et autres perturbations rayonnées*. Publication fondamentale en CEM

CEI/TR 61000-4-32, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-32: Techniques d'essai et de mesure – Compendium des simulateurs IEMN-HA*

CEI/TR 61000-5-3, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5-3: Guides d'installation et d'atténuation – Concepts de protection IEMN-HA*. Publication fondamentale en CEM

CISPR 16-1-1, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-1: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Appareils de mesure*

CISPR 16-1-4, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-4: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Matériels auxiliaires – Perturbations rayonnées*

CISPR 16-2-3, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 2-3: Méthodes de mesure des perturbations et de l'immunité – Mesures des perturbations rayonnées*

CISPR 16-2-4, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 2-4: Méthodes de mesure des perturbations et de l'immunité – Mesures de l'immunité*

CISPR 22, *Appareils de traitement de l'information – Caractéristiques des perturbations radioélectriques – Limites et méthodes de mesure*

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050(161), *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*.

IEC 61000-2-11, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments*. Basic EMC publication

IEC 61000-4-23, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances*. Basic EMC publication

IEC/TR 61000-4-32, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-32: Testing and measurement techniques – HEMP simulator compendium*

IEC/TR 61000-5-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-3: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection concepts*. Basic EMC publication

CISPR 16-1-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus*

CISPR 16-1-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Ancillary equipment – Radiated disturbances*

CISPR 16-2-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity – Radiated disturbance measurements*

CISPR 16-2-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-4: Methods of measurement of disturbances and immunity – Immunity measurements*

CISPR 22, *Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*

3 Définitions et abréviations

3.1 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61000, les définitions données dans la CEI 60050(161) (VEI), ainsi que les suivantes, s'appliquent.

3.1.1

mode électromagnétique transverse (TEM)

mode d'un guide d'onde dans lequel les composantes des champs électrique et magnétique dans la direction de propagation sont très inférieures aux composantes primaires de champ dans n'importe quelle section transverse

3.1.2

guide d'onde TEM

système de ligne de transmission ouverte ou fermée, dans lequel une onde se propage en mode électromagnétique transverse pour produire un champ spécifié en vue de la réalisation d'essais

3.1.3

cellule TEM

guide d'onde TEM fermé, souvent ligne coaxiale rectangulaire, dans laquelle une onde se propage en mode électromagnétique transverse pour produire un champ spécifique en vue de la réalisation d'essais. Le conducteur extérieur enveloppe complètement le conducteur intérieur

3.1.4

guide d'onde TEM à deux accès

guide d'onde TEM avec accès de mesure d'entrée/sortie aux deux extrémités

3.1.5

guide d'onde TEM à un accès

guide d'onde TEM avec accès de mesure unique d'entrée/sortie. De tels guides d'onde TEM présentent généralement une terminaison de ligne à large bande à l'extrémité de l'accès ne servant pas à la mesure

3.1.6

ligne ouverte

ligne de transmission chargée comprenant au moins deux plaques parallèles entre lesquelles une onde se propage en mode électromagnétique transverse pour produire un champ spécifique en vue de la réalisation d'essais. Généralement, les côtés sont ouverts pour l'accès et la surveillance de l'appareil en essai

3.1.7

conducteur intérieur ou septum

conducteur intérieur d'un système de ligne de transmission coaxiale, souvent plat dans le cas d'une section rectangulaire. Le conducteur intérieur peut être positionné de manière symétrique ou asymétrique par rapport au conducteur extérieur

3.1.8

conducteur extérieur ou enveloppe

conducteur extérieur d'un système de ligne de transmission coaxiale, souvent de section rectangulaire

3 Definitions and abbreviations

3.1 Definitions

For the purposes of this part of IEC 61000, the definitions given in IEC 60050(161) (IEV), as well as the following, apply.

3.1.1

transverse electromagnetic (TEM) mode

waveguide mode in which the components of the electric and magnetic fields in the propagation direction are much less than the primary field components across any transverse cross-section

3.1.2

TEM waveguide

open or closed transmission line system, in which a wave is propagating in the transverse electromagnetic mode to produce a specified field for testing purposes

3.1.3

TEM cell

enclosed TEM waveguide, often a rectangular coaxial line, in which a wave is propagated in the transverse electromagnetic mode to produce a specific field for testing purposes. The outer conductor completely encloses the inner conductor

3.1.4

two-port TEM waveguide

TEM waveguide with input/output measurement ports at both ends

3.1.5

one-port TEM waveguide

TEM waveguide with a single input/output measurement port. Such TEM waveguides typically feature a broadband line termination at the non-measurement-port end

3.1.6

stripline

terminated transmission line consisting of two or more parallel plates between which a wave is propagated in the transverse electromagnetic mode to produce a specific field for testing purposes. Usually the sides are open for EUT access and monitoring

3.1.7

inner conductor or septum

inner conductor of a coaxial transmission line system, often flat in the case of a rectangular cross-section. The inner conductor may be positioned symmetrically or asymmetrically with respect to the outer conductor

3.1.8

outer conductor or housing

outer conductor of a coaxial transmission line system, often having a rectangular cross-section

3.1.9**impédance caractéristique**

pour tout front d'onde de phase constant, amplitude du rapport de la tension entre le conducteur intérieur et le conducteur extérieur, sur le courant dans l'un des conducteurs. L'impédance caractéristique ne dépend pas des amplitudes tension/courant et ne dépend que de la géométrie de section de la ligne de transmission. Les guides d'onde TEM sont normalement conçus pour avoir une impédance caractéristique de 50 Ω . Les guides d'onde TEM ayant une impédance caractéristique de 100 Ω sont souvent utilisés pour les essais de transitoires

3.1.10**matériau anéchoïque**

matériau qui présente la propriété d'absorber sinon de réduire le niveau d'énergie électromagnétique réfléchi par ce matériau

3.1.11**terminaison de ligne à large bande**

terminaison qui combine une charge discrète basse fréquence, pour s'adapter à l'impédance caractéristique des guides d'onde TEM (normalement 50 Ω), à un volume de matériau anéchoïque haute fréquence

3.1.12**algorithme de corrélation**

routine mathématique pour convertir les mesures de tension des guides d'onde TEM en niveaux d'intensité de champ d'emplacements d'essai en espace libre (OATS), de chambre semi-anéchoïque, ou d'espace libre

3.1.13**type d'appareil en essai (type d'EST)**

groupement de produits présentant des caractéristiques électromagnétiques suffisamment similaires pour permettre des essais avec la même installation d'essai et le même protocole d'essai

3.1.14**câble de sortie**

câble qui relie l'appareil en essai aux équipements externes à la ligne TEM ou qui sort du volume d'essai utilisable défini en 5.1.2

3.1.15**câble d'interconnexion**

câble qui relie des sous-composants de l'appareil en essai à l'intérieur du volume d'essai mais qui ne sort pas du volume d'essai

3.1.16**support du montage d'essai**

support non réfléchissant, non-conducteur, à faible permittivité et référence de positionnement qui permet des rotations précises de l'appareil en essai comme celles exigées par un algorithme de corrélation ou un protocole d'essai

NOTE 1 De la mousse de polystyrène constitue un matériau type. Les supports en bois ne sont pas recommandés (voir [7]¹).

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie figurant en annexe.

3.1.9**characteristic impedance**

for any constant phase wave-front, the magnitude of the ratio of the voltage between the inner conductor and the outer conductor to the current on either conductor. The characteristic impedance is independent of the voltage/current magnitudes and depends only on the cross-sectional geometry of the transmission line. TEM waveguides are typically designed to have a 50 Ω characteristic impedance. TEM waveguides with a 100 Ω characteristic impedance are often used for transient testing

3.1.10**anechoic material**

material that exhibits the property of absorbing, or otherwise reducing, the level of electromagnetic energy reflected from that material

3.1.11**broadband line termination**

termination which combines a low-frequency discrete-component load, to match the characteristic impedance of the TEM waveguides (typically 50 Ω), and a high-frequency anechoic-material volume

3.1.12**correlation algorithm**

mathematical routine for converting TEM waveguide voltage measurements to open-area test sites (OATS), semi-anechoic chamber (SAC), or free space field strength levels

3.1.13**EUT type**

grouping of products with sufficient similarity in electromagnetic characteristics to allow testing with the same test installation and the same test protocol

3.1.14**exit cable**

cable that connects the EUT to equipment external to the TEM waveguide or exiting the usable test volume defined in 5.1.2.

3.1.15**interconnecting cable**

cable that connects subcomponents of the EUT within the test volume but does not exit the test volume

3.1.16**test set-up support**

non-reflecting, non-conducting, low-permittivity support and positioning reference that allows for precise rotations of the EUT as required by a correlation algorithm or test protocol

NOTE 1 A typical material is foamed polystyrene. Wooden supports are not recommended (see [7]¹).

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

3.1.17

ortho-angle

angle formé par la diagonale d'un cube avec chaque face de côté aux coins trièdres du cube. Le cube étant aligné avec le système de coordonnées cartésiennes du guide d'onde TEM, les angles azimutaux et d'élévation de la projection de la diagonale du cube sont de 45° et les angles avec les bords de face de 54,7° (voir Figure A.2a)

NOTE 2 Lorsqu'il est associé à l'appareil en essai, cet angle est généralement désigné comme l'ortho-axe.

3.1.18

composante primaire (de champ)

composante de champ électrique alignée avec la polarisation d'essai prévue

NOTE 3 Par exemple, dans les cellules TEM à deux accès conventionnelles, le septum est parallèle au plancher horizontal et le vecteur du champ électrique de mode primaire est vertical au centre transverse de la cellule TEM.

3.1.19

composante secondaire (de champ)

dans un système de coordonnées cartésiennes, une des deux composantes de champ électrique orthogonales à la composante primaire de champ et orthogonales l'une à l'autre

3.1.20

champ résultant (amplitude)

racine carrée de la somme des carrés, exprimés en V/m, de la composante primaire et des deux composantes secondaires de champ

3.1.21

manipulateur

tout type d'aménagement non métallique manuel ou automatique semblable à une table tournante et capable de supporter, dans de nombreuses positions exigées par un algorithme de corrélation ou un protocole d'essai, un appareil en essai fixé. Le matériau doit répondre aux exigences définies pour le support du montage d'essai (voir 3.1.16). Par exemple, voir la Figure A.2

3.1.22

guide d'onde TEM ayant subi une hyper-rotation

guide d'onde TEM qui a été réorienté de telle manière que son ortho-axe se trouve perpendiculaire à la surface de la terre (voir [6])

3.1.23

dépendance/indépendance de la gravité

la force de gravitation de la terre a une direction fixe. L'appareil en essai peut tourner autour de ces trois axes. A cause des positions de rotation différentes, l'appareil en essai est influencé dans des directions différentes par la force de gravitation. L'appareil en essai est indépendant de la gravité s'il fonctionne correctement dans toutes les positions, c'est-à-dire qu'il fonctionne correctement indépendamment de la direction du vecteur de gravité par rapport à l'appareil en essai. L'appareil en essai est dépendant de la gravité s'il ne fonctionne pas correctement dans une ou plusieurs positions d'essai

3.1.17**ortho-angle**

angle that the diagonal of a cube makes to each side face at the trihedral corners of the cube. Assuming that the cube is aligned with the TEM waveguide Cartesian coordinate system, the azimuth and elevation angles of the projection of the cube diagonal are 45° , and the angles to the face edges are $54,7^\circ$ (see Figure A.2a)

NOTE 2 When associated with the EUT, this angle is usually referred to as the ortho-axis.

3.1.18**primary (field) component**

electric field component aligned with the intended test polarization

NOTE 3 For example, in conventional two-port TEM cells, the septum is parallel to the horizontal floor, and the primary mode electric field vector is vertical at the transverse centre of the TEM cell.

3.1.19**secondary (field) component**

in a Cartesian coordinate system, either of the two electric field components orthogonal to the primary field component and orthogonal to each other

3.1.20**resultant field (amplitude)**

root-sum-squared values in V/m of the primary and the two secondary field components

3.1.21**manipulator**

any type of manual or automatic non-metallic fixtures similar to a turntable, and capable of supporting an affixed EUT throughout numerous positions as required by a correlation algorithm or test protocol. The material has to meet the requirements defined for the test set-up support (see 3.1.16). For example, see Figure A.2

3.1.22**hyper-rotated TEM waveguide**

TEM waveguide that has been reorientated such that its ortho-axis is normal to the Earth's surface (see [6])

3.1.23**gravity-dependent / -independent**

the gravitation force of the earth has a fixed direction. The EUT can be rotated around all three axes. Due to different rotation positions the EUT is affected by the gravitation force in different directions. The EUT is gravity-independent if it is working properly in all positions, which means working properly regardless of the direction of the gravity vector relative to the EUT. The EUT is gravity-dependent if it does not work properly in one or more test positions

3.2 Abréviations

BALUN	Symétriseur
EST	Appareil en essai
DFT	Transformée de Fourier Discrète
FFT	Transformée de Fourier Rapide
GTEM	Mode transverse électromagnétique gigahertz
IEM-HA	Impulsion Électromagnétique à Haute Altitude
OATS	Emplacement d'essai en espace libre (open area test site)
RF	Radiofréquence
TE	Transverse électrique (mode), (mode H)
TEM	Mode transverse électromagnétique (transverse electromagnetic mode)
TM	Transverse magnétique (mode), (mode E)
ROS	Rapport d'Onde Stationnaire

4 Généralités

Cette norme décrit les caractéristiques fondamentales et les limitations des guides d'onde TEM, essentiellement le volume d'essai, l'uniformité de champ, la pureté du mode TEM et les gammes de fréquences. Une introduction et certaines caractéristiques fondamentales des guides d'onde TEM sont données à l'Annexe D.

Les mesures des émissions rayonnées dans un guide d'onde TEM sont généralement en corrélation avec les méthodes de l'emplacement d'essai en espace libre (OATS) et de la chambre semi-anéchoïque, qui fournissent des résultats de mesure valables et reproductibles du champ perturbateur provenant des appareils. Dans ce cas, des algorithmes dits de corrélation sont utilisés pour convertir les résultats des mesures dans les guides d'onde TEM en données équivalentes OATS, comme cela est décrit à l'Annexe A. Il convient que les comités de produits démontrent qu'il existe une bonne corrélation entre les résultats des mesures en utilisant des produits des types généralement utilisés.

Les guides d'onde TEM peuvent également être utilisés comme générateurs de champs pour les essais d'immunité des appareils aux champs électromagnétiques. Des précisions sont données à l'Annexe B. L'essai d'immunité en guides d'onde TEM est cité dans plusieurs autres normes dont la liste est donnée à l'Annexe E.

Les mesures avec les guides d'onde TEM ne sont pas limitées aux mesures des perturbations rayonnées sur des appareils complètement assemblés; elles peuvent également être appliquées aux essais des composants, des circuits intégrés, et d'efficacité de blindage des matériaux des joints d'étanchéité et des câbles.

5 Exigences concernant les guides d'onde TEM

Les guides d'onde TEM peuvent être utilisés pour les mesures d'émission et d'immunité lorsque certaines exigences sont satisfaites. Les méthodes suivantes doivent être appliquées pour valider un guide d'onde TEM.

NOTE Cet article se concentre sur les aspects généraux de validation tels que le mode TEM fondamental et l'homogénéité du champ. Les exigences spécifiques de validation pour les essais d'émission, d'immunité et de transitoires sont données dans les annexes.

3.2 Abbreviations

BALUN	Balanced-to-unbalanced transformer
DFT	Discrete Fourier Transform
EUT	Equipment under test
FFT	Fast Fourier Transform
GTEM	Gigahertz transverse electromagnetic mode
HEMP	High-altitude electromagnetic pulse
OATS	Open-area test site
PoE	Points of entry
RF	Radiofrequency
SAC	Semi-anechoic chamber
SPD	Surge protective device
TDR	Time-domain reflectometer
TE	Transverse electric (mode), (H-mode)
TEM	Transverse electromagnetic mode
TM	Transverse magnetic (mode), (E-mode)
VSWR	Voltage-standing-wave-ratio

4 General

This standard describes basic characteristics and limitations of TEM waveguides, namely test volume, field uniformity, purity of the TEM mode, and frequency ranges. An introduction and some fundamental characteristics of TEM waveguides are given in Annex D.

Radiated emission measurements in a TEM waveguide are usually correlated with the open-area test site (OATS) and semi-anechoic chamber (SAC) methods, which provide valid and repeatable measurement results of disturbance field strength from equipment. In this case so-called correlation algorithms are used to convert TEM waveguide measurement results to OATS-equivalent data, as described in Annex A. Product committees should demonstrate that good correlation exists between measurement results using typical product types.

TEM waveguides can also be used as field generators for testing the immunity of equipment to electromagnetic fields. Details are given in Annex B. Immunity testing in TEM waveguides is cited in several other standards listed in Annex E.

TEM waveguide measurements are not restricted to radiated measurements on fully assembled equipment; they may also be applied to the testing of components, integrated circuits, and the shielding effectiveness of gasket materials and cables.

5 TEM waveguide requirements

TEM waveguides can be used for emission and immunity measurements when certain requirements are met. For the validation of a TEM waveguide the following methods shall be applied.

NOTE This clause focuses on general validation aspects such as the dominant TEM mode and field homogeneity. Specific validation requirements for emission, immunity, and transient testing are given in the annexes.

5.1 Exigences générales pour l'utilisation des guides d'onde TEM

5.1.1 Vérification du mode TEM

Les guides d'onde TEM peuvent présenter des résonances au-delà d'une certaine fréquence de coupure déterminée par les dimensions de la section transversale et/ou de la longueur du guide d'onde. Pour des raisons pratiques, on considère que le champ à l'intérieur d'un guide d'onde TEM se propage dans un mode TEM lorsque les exigences suivantes sont satisfaites. Généralement un fabricant de guide d'onde TEM doit vérifier et donner des indications concernant le comportement en mode TEM sur la gamme de fréquences voulue, et inclure les données de vérification dans la documentation du système.

NOTE 1 Il est nécessaire que le comportement en mode TEM soit confirmé à intervalles réguliers (voir B.2.2).

En utilisant une procédure d'étalonnage à zone uniforme du type de celles utilisées pour l'immunité (conforme à B.2.2), les amplitudes des composantes des champs électriques secondaires (non prévues), doivent être inférieures d'au moins 6 dB à la composante primaire du champ électrique, sur au moins 75 % des points mesurés sur une section définie du guide d'onde TEM (perpendiculaire à la direction de propagation). Pour ces 75 % des points de mesure, une tolérance sur la composante de champ électrique primaire supérieure à -0 dB et allant jusqu'à $+10$ dB, ou un niveau de composante de champ électrique secondaire allant jusqu'à -2 dB de la composante de champ primaire, est autorisé pour un maximum de 3 % des fréquences d'essai (au moins une fréquence), dans la mesure où la tolérance et les fréquences réelles sont indiquées dans les rapports d'essai. Pour les guides d'onde TEM de grande taille, un maximum de 3 % des fréquences d'essai est recommandé; jusqu'à 5 % sont autorisées si cela est indiqué dans les rapports d'essai. La gamme de fréquences est comprise entre 30 MHz et la fréquence la plus élevée d'utilisation prévue du guide d'onde TEM. Le premier palier de fréquence ne doit pas dépasser 1 % de la fréquence fondamentale et ensuite 1 % de la fréquence précédente de 80 MHz à 1 000 MHz, 5 % en dessous de 80 MHz et au-dessus de 1 000 MHz. Une des contraintes de la vitesse de balayage est constituée par le temps de réponse de la sonde de champ. Cette vérification du mode TEM s'applique aux guides d'onde utilisés soit pour les essais d'immunité, soit pour les essais d'émission.

NOTE 2 Pour les mesures de transitoires, il convient que la fréquence de départ soit de 100 kHz.

NOTE 3 Le critère de 6 dB de 5.1.1 spécifie le mode TEM fondamental et non l'uniformité de champ. Un champ est considéré comme uniforme si les exigences de B.2.2 sont satisfaites. D'autres informations concernant l'uniformité de champ sont données en [17].

5.1.2 Volume d'essai et taille maximale de l'appareil en essai

La taille maximale d'un appareil en essai est liée à la taille du «volume d'essai utilisable» dans le guide d'onde TEM. Le «volume d'essai utilisable» du guide d'onde TEM dépend de la taille, de la géométrie et de la distribution spatiale des champs électromagnétiques.

Le «volume d'essai utilisable» d'un guide d'onde TEM (voir Figures A.6 à A.9) dépend de la «zone uniforme» telle qu'elle est définie en B.2.2. La direction de propagation du mode TEM du guide d'onde (normalement l'axe z) est perpendiculaire à la zone uniforme (plane transversale, normalement plan xy). Dans le plan xy , la section entière du volume d'essai utilisable doit satisfaire aux exigences de la zone uniforme définies en B.2.2. La valeur minimale pour la distance h_{EUT} entre l'appareil en essai et chaque conducteur ou absorbant du guide d'onde (voir Figures A.6 à A.9) est donnée par la distance entre la limite de la zone uniforme (voir B.2.2) et le conducteur. Cependant, il convient que la distance h_{EUT} ne soit pas nulle pour éviter l'éventuelle modification de la condition de fonctionnement de l'appareil en essai par le couplage étroit de l'appareil en essai et des conducteurs du guide d'onde (recommandation: il convient que h_{EUT} soit supérieure à $0,05 h$). Le long de l'axe z (direction de propagation), le volume d'essai utilisable est limité par $z_{min} \leq z \leq z_{max}$. La longueur du volume d'essai est de $L = z_{max} - z_{min}$. Les exigences concernant une zone uniforme doivent être satisfaites pour des sections pour chaque z où $z_{min} \leq z \leq z_{max}$. On peut estimer que les exigences de mode TEM sont satisfaites pour $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ dans les conditions suivantes:

5.1 General requirements for the use of TEM waveguides

5.1.1 TEM mode verification

TEM waveguides may exhibit resonances above a certain cut-off frequency determined by the cross-sectional dimensions and/or the waveguide length. For practical use, the field in a TEM waveguide is considered to propagate in a TEM mode when the following requirements are met. Generally, a TEM waveguide manufacturer has to verify and document the TEM mode behaviour over the desired frequency range and include verification data with the system documentation.

NOTE 1 The TEM mode behaviour must be confirmed at regular intervals (see B.2.2).

Using an immunity-type uniform-area calibration procedure (according to B.2.2) the magnitudes of the secondary (unintended) electric field components shall be at least 6 dB less than the primary component of the electric field, over at least 75 % of the measured points in a defined cross-section of the TEM waveguide (perpendicular to the propagation direction). For this 75 % of measurement points, a primary electric field component tolerance greater than $^{-0}_{+6}$ dB up to $^{-0}_{+10}$ dB, or a secondary electric field component level up to –2 dB of the primary field component, is allowed for a maximum of 3 % of the test frequencies (at least one frequency), provided that the actual tolerance and frequencies are stated in the test reports. For large TEM waveguides a maximum of 3 % of the test frequencies is recommended; up to 5 % is allowed if stated in the test reports. The frequency range is 30 MHz up to the highest frequency of intended use of the TEM waveguide. The first frequency step shall not exceed 1 % of the fundamental frequency and thereafter 1 % of the preceding frequency in 80 MHz to 1 000 MHz, 5 % below 80 MHz and above 1 000 MHz. One constraint on the sweep speed is the response time of the field probe. This verification of the TEM mode applies to waveguides used either for immunity or emissions testing.

NOTE 2 For transient measurements the start frequency should be 100 kHz.

NOTE 3 The 6 dB criterion from 5.1.1 specifies the dominant TEM mode and not the field uniformity. A field is considered uniform if the requirements of B.2.2 are fulfilled. Further information about field uniformity is given in [17].

5.1.2 Test volume and maximum EUT size

The maximum size of an EUT is related to the size of the “usable test volume” in the TEM waveguide. The “usable test volume” of the TEM waveguide depends on the size, geometry, and the spatial distribution of the electromagnetic fields.

The “usable test volume” of a TEM waveguide (see Figures A.6 to A.9) depends on the “uniform area” as defined in B.2.2. The propagation direction of the waveguide TEM mode (typically z-axis) is perpendicular to a uniform area (transverse plane, typically xy-plane). In the xy-plane the whole cross-section of the usable test volume has to fulfil the requirements of the uniform area defined in B.2.2. The minimum value for the distance h_{EUT} between EUT and each conductor or absorber of the waveguide (see Figures A.6 to A.9) is given by the distance between the boundary of the uniform area (see B.2.2) and the conductor. However, h_{EUT} should not be zero, in order to avoid the possible change of the EUT operational condition by the close coupling between EUT and conductors of the waveguide (recommended: h_{EUT} should be larger than 0,05 h). Along the z-axis (propagation direction) the usable test volume is limited by $z_{\text{min}} \leq z \leq z_{\text{max}}$. The length of the test volume is $L = z_{\text{max}} - z_{\text{min}}$. The requirements of a uniform area have to be fulfilled for cross-sections at each z with $z_{\text{min}} \leq z \leq z_{\text{max}}$. It can be assumed that the TEM mode requirements are fulfilled for $z_{\text{min}} \leq z \leq z_{\text{max}}$ under the following conditions:

- si les exigences de mode TEM sont satisfaites à la position $z_{\max}$ et que la géométrie du guide d'onde est similaire à l'un des types indiqués aux Figures A.6 à A.9 avec un rapport de h à w d'aspect constant (forme propre) pour $0 < z < z_{\max}$, ou
- si les exigences du mode TEM sont satisfaites aux positions $z_{\min}$ et $z_{\max}$ et que la section de guide d'onde est constante ou réduite de manière uniforme pour $z_{\min} < z < z_{\max}$ et les dérivées dh/dz et dw/dz constituent une fonction lissée pour $z_{\min} < z < z_{\max}$ (pas de pliures ou de paliers dans les géométries de conducteurs).

La taille maximale de l'appareil en essai est liée à la taille du «volume d'essai utilisable». L'appareil en essai ne doit pas être d'une taille supérieure à $0,6 w \times 0,6 L$ (voir les Figures A.6 à A.9).

NOTE 1 La série ISO 11452 recommande une taille d'appareil en essai de $0,33 w \times 0,6 L$ et la MIL-STD 462D recommande $0,5 w \times 0,5 L$.

Il est recommandé que la hauteur maximale utilisable de l'appareil en essai soit de $0,33 h$, avec h égal à la distance entre les conducteurs intérieur et extérieur au centre de l'appareil en essai dans le volume d'essai (par exemple, entre le septum et la base dans une cellule TEM). Pour tous les guides d'onde TEM, l'appareil en essai doit tenir à l'intérieur du volume d'essai utilisable pour toutes les positions de rotation.

NOTE 2 La plupart des normes réduisent la taille de l'appareil en essai à $0,33 h$. La plupart des fiches techniques provenant des fournisseurs de cellules TEM limitent la hauteur de l'appareil en essai à un maximum de $0,5 h$. Sauf pour les étalonnages de haute précision, comme pour les sonde et les capteurs de champ, la hauteur de l'appareil en essai peut dépasser $0,33 h$, mais il ne faut pas qu'elle dépasse les recommandations du fabricant. La hauteur maximale utilisable de l'appareil en essai peut être supérieure à $0,33 h$ si le fabricant fournit des informations concernant l'incertitude de mesure pour des appareils en essai de plus grande taille. L'incertitude de mesure sera indiquée dans le rapport d'essai. Des informations supplémentaires concernant les effets des guides d'onde chargés sont données en [25].

5.1.3 Effets des guides d'onde chargés

A l'étude.

NOTE 1 Pour mesurer les effets d'un guide d'onde chargé, les procédures suivantes ont été proposées:

- mesures du courant de surface sur l'appareil en essai placé en espace libre (OATS est également une option) ou dans un guide d'onde TEM;
- mesures de champ avec un capteur isotrope;
- mesures avec réflectomètre temporel en accès d'entrée ou de mesures de rapport d'onde stationnaire (ROS);
- perte d'insertion pour lignes TEM à deux accès;
- monopole inséré par le conducteur extérieur de la ligne TEM.

NOTE 2 Pour les émissions rayonnées, les corrélations avec de grands appareils en essai ont montré une extension moyenne de 1 dB du champ corrélé (voir [20]).

NOTE 3 Il convient également de vérifier le support du montage d'essai ou le manipulateur (voir [4]).

- if TEM mode requirements are fulfilled at the position $z_{\max}$, and the geometry of the waveguide is similar to one of the types shown in Figures A.6 to A.9 with a constant aspect ratio of h to w (inherent shape) for $0 < z < z_{\max}$, or,
- if TEM mode requirements are fulfilled at the positions $z_{\min}$ and $z_{\max}$, and the waveguide cross-section is constant or uniformly tapered for $z_{\min} < z < z_{\max}$ and the derivatives dh/dz and dw/dz are a smooth function for $z_{\min} < z < z_{\max}$ (no kinks or steps in the conductor geometries).

The maximum size of an EUT is related to the size of the “usable test volume”. The EUT shall not be larger than $0,6 w$ times $0,6 L$ (see Figures A.6 to A.9).

NOTE 1 The ISO 11452 series recommends an EUT size of $0,33 w \times 0,6 L$, and MIL-STD 462D recommends $0,5 w \times 0,5 L$.

The maximum usable EUT height is recommended to be $0,33 h$, with h equal to the distance between the inner and outer conductors (conductor spacing) at the centre of the EUT in the test volume (for example, between septum and floor in a TEM cell). For all TEM waveguides, the EUT shall fit within the usable test volume for all rotation positions.

NOTE 2 Most standards restrict EUT size to $0,33 h$. Most data sheets from TEM cell suppliers limit the EUT height to a maximum of $0,5 h$. Except for highly accurate calibration, such as for field probes and sensors, the EUT height can exceed $0,33 h$, but it must not exceed the manufacturer's recommendations. The maximum usable EUT height can be higher than $0,33 h$ if the manufacturer provides information about the measurement uncertainty for larger EUTs. The measurement uncertainty must be stated in the test report. More information about loaded waveguide effects is given in [25].

5.1.3 Loaded waveguide effects

Under consideration.

NOTE 1 To measure the effects of a loaded waveguide, the following procedures have been proposed:

- surface current measurements on the EUT placed in free space (OATS is also an option) or in a TEM waveguide;
- field measurements with an isotropic sensor;
- input-port time-domain reflectometer (TDR) or voltage-standing-wave-ratio (VSWR) measurements;
- insertion loss for two-port TEM waveguides;
- monopole inserted through the outer conductor of the TEM waveguide.

NOTE 2 For radiated emissions, correlations with large EUTs have shown an average 1 dB enhancement in correlated field strength (see [20]).

NOTE 3 Influence of the test set-up support or manipulator should also be checked (see [4]).

5.2 Exigences spécifiques pour certains types de guides d'onde TEM

5.2.1 Montage de guides d'onde TEM ouverts

Pour réduire les effets ambiants, il convient d'installer les guides d'onde TEM à l'intérieur d'un local blindé.

NOTE 1 Le signal ambiant autorisé est défini aux Annexes A, B, C et dépend en grande partie des objectifs d'essai.

Une distance minimale h correspondant à un espacement d'une plaque est nécessaire entre le guide d'onde TEM ouvert et le plancher, les murs, et le plafond du local blindé. Un matériau anéchoïque complémentaire peut être placé de manière appropriée dans le local blindé pour réduire les réflexions.

Les distances ci-dessus ne sont données qu'à titre indicatif. La réflexion (et la transmission dans des cellules à deux accès) est la mesure finale pour un découplage suffisant du guide d'onde TEM du local blindé. A noter qu'il est possible de construire un guide d'onde TEM ouvert lorsqu'une plaque est constituée par le plancher du local blindé et que l'autre est un septum installé.

NOTE 2 La MIL-STD 462 exige que les guides d'onde TEM ouverts soient placés dans un local blindé. Il convient que la distance minimale requise par rapport aux murs soit fixée en fonction de la taille du guide d'onde. La MIL-STD 462D RS105 demande une distance égale à $2 \times h$ entre le plan métallique le plus proche y compris le plafond, les parois du local blindé etc, h étant la séparation verticale maximale des plaques. La CISPR 20 exige une distance minimale de 800 mm avec les parois, le plancher et le plafond correspondant à h .

5.2.2 Vérification alternative du mode TEM pour un guide d'onde TEM à deux accès

Comme alternative à 5.1.1, la gamme de fréquences utile d'un guide d'onde TEM à deux accès peut être établie en utilisant la méthode de mesure suivante.

Avant de soumettre un appareil aux essais, les résonances de la ligne TEM doivent être déterminées pour des dispositifs TEM à deux accès avec le montage d'essai et l'appareil en essai installés, l'appareil en essai n'étant pas sous tension. Dans ce cas, la perte de transmission de la cellule TEM dans la gamme de fréquences utile doit être

$$A_{tloss} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{refl}}{P_{fwd}} + \frac{P_{output}}{P_{fwd}} \right) \leq 1 \text{ dB} \quad (1)$$

où

A_{tloss} est la perte en transmission du guide d'onde chargé, en dB;

P_{refl} est la puissance réfléchie mesurée à l'accès d'entrée, en W;

P_{fwd} est la puissance transmise mesurée à l'accès d'entrée, en W;

P_{output} est la puissance de sortie mesurée au deuxième accès (sortie), en W.

NOTE 1 La puissance réfléchie (en entrée), transmise et réfléchie (en sortie) est mesurée par rapport à l'impédance caractéristique du guide d'onde TEM. On n'utilise pas de transformateur d'impédance. Elle est uniquement mesurée «en ligne». L'Equation (1) est valable pour une impédance caractéristique de 50 Ω .

NOTE 2 Il s'agit d'une méthode de vérification alternative pour un guide d'onde TEM à deux accès du type indiqué dans l'ISO 11452-3. Elle est fondée sur l'hypothèse selon laquelle les modes résonants d'ordre élevé extraient l'énergie du mode TEM.

5.2 Special requirements for certain types of TEM waveguides

5.2.1 Set-up of open TEM waveguides

To minimize ambient effects, open TEM waveguides should be installed inside a shielded room.

NOTE 1 The permitted ambient signal is defined in Annexes A, B, and C and strongly depends on the test objectives.

A minimum distance of one plate spacing h from the open TEM waveguide to the shielded-room floor, walls, and ceiling is required. Additional anechoic material can be placed appropriately in the shielded room to minimize reflections.

The distances above are given for guidance only. The reflection (and transmission in two-port cells) is the final measure for sufficient decoupling of the TEM waveguide from the shielded room. Note that it is possible to construct an open TEM waveguide where one plate consists of the floor of the shielded room and the other is an installed septum.

NOTE 2 MIL-STD 462 requires open TEM waveguides to be positioned in a shielded room. The required minimum distance to walls should be set in relation to the size of the waveguide. MIL-STD 462D RS105 requires a distance of two times h from the closest metallic ground including ceiling, shielded room walls, and so forth, where h is the maximum vertical separation of the plates. CISPR 20 requires a minimum distance of 800 mm from walls, floor, and ceiling, corresponding to one h .

5.2.2 Alternative TEM mode verification for a two-port TEM waveguide

As an alternative to 5.1.1 the useful frequency range of a two-port TEM waveguide can be established using the following measurement method.

Before testing the EUT, the TEM waveguide resonances shall be determined for two-port TEM devices with the test set-up and EUT installed, with EUT power off. In this case, the transmission loss of the TEM waveguide in the useful frequency range shall be

$$A_{tloss} = \left| 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{refl}}{P_{fwd}} + \frac{P_{output}}{P_{fwd}} \right) \right| \leq 1 \text{ dB} \quad (1)$$

where

A_{tloss} is the transmission loss of the loaded waveguide, in dB;

P_{refl} is the reflected power measured at the input port, in W;

P_{fwd} is the forward power measured at the input port, in W;

P_{output} is the output power measured at the second (output) port, in W.

NOTE 1 The reflected, forward and backward (output) power is measured with respect to the characteristic impedance of the TEM waveguide. An impedance transformer is not used. It is measured "in line" only. Equation (1) is valid for a 50 Ω characteristic impedance.

NOTE 2 This is an alternative verification method for a two-port TEM waveguide of the type listed in ISO 11452-3. It is based on the assumption that resonating higher order modes will extract energy from the TEM mode.

5.3 Considérations à propos de l'incertitude de mesure

Des procédures générales pour évaluer les incertitudes de mesure sont à l'étude. Les procédures qui suivent A.4.2.1 sont recommandées pour estimer les incertitudes.

NOTE Les méthodes d'estimation de l'incertitude pour les guides d'onde TEM sont discutées entre autres en [3], [22] et [30].

6 Vue d'ensemble des types d'appareils en essai

Un type d'appareil en essai est un groupe de produits présentant des caractéristiques électromagnétiques ou des dimensions mécaniques suffisamment similaires pour permettre des essais avec la même installation d'essai et le même protocole d'essai. Le type d'appareil en essai et sa configuration sont valables pour les essais d'immunité et la mesure d'émission pour permettre un montage uniforme dans le volume d'essai.

6.1 Petit appareil en essai

Un appareil en essai est défini comme un petit appareil en essai si la plus grande dimension du châssis est inférieure à une longueur d'onde à la fréquence d'essai la plus élevée (par exemple, à 1 GHz, $\lambda = 300$ mm), et si aucun câble n'est connecté à l'appareil en essai. Tous les autres appareils en essai sont définis comme des appareils en essai de grande taille.

6.2 Appareil en essai de grande taille

Un appareil en essai est défini comme un appareil en essai de grande taille s'il s'agit

- d'un appareil en essai de petite taille avec un ou plusieurs câbles de sortie,
- d'un appareil en essai de petite taille avec un ou plusieurs câbles autres que de sortie connectés,
- d'un appareil en essai avec ou sans câbles qui a une dimension supérieure à une longueur d'onde à la fréquence d'essai la plus élevée,
- d'un groupe d'appareils en essai de petite taille disposés dans un montage d'essai avec des câbles d'interconnexion autres que de sortie et avec ou sans câbles de sortie.

5.3 Measurement uncertainty considerations

General procedures to evaluate measurement uncertainties are under consideration. Procedures following A.4.2.1 are recommended to estimate uncertainties.

NOTE Uncertainty estimation methods for TEM waveguides are discussed, for example, in [3], [22] and [30].

6 Overview of EUT types

An EUT type is a group of products with sufficient similarity in electromagnetic characteristics or mechanical dimensions that testing with the same test installation and the same test protocol is allowable. The EUT type and its configuration are valid for immunity testing and emission measurement to allow a uniform arrangement in the test volume.

6.1 Small EUT

An EUT is defined as a small EUT if the largest dimension of the case is smaller than one wavelength at the highest test frequency (for example, at 1 GHz $\lambda = 300$ mm), and if no cables are connected to the EUT. All other EUTs are defined as large EUTs.

6.2 Large EUT

An EUT is defined as a large EUT if it is

- a small EUT with one or more exit cables,
- a small EUT with one or more connected non-exit cables,
- an EUT with or without cable(s) which has a dimension larger than one wavelength at the highest test frequency,
- a group of small EUTs arranged in a test set-up with interconnecting non-exit cables, and with or without exit cables.

Annexe A (normative)

Essais d'émission dans les guides d'onde TEM

A.1 Introduction

Cette annexe décrit les essais d'émission dans les guides d'onde TEM. Il convient normalement que la validation du guide d'onde TEM et les données de corrélation soient fournies par le fabricant du guide d'onde TEM (Articles A.3 et A.4). Ceci permet à l'utilisateur de concentrer son attention sur les Articles A.5 et A.6.

Deux méthodes sont possibles pour déterminer la conformité des résultats d'essai d'émission des guides d'onde TEM avec une limite.

- Sans corrélation avec la méthode OATS

Cette approche a été appliquée à des familles de produits spécifiques, (par exemple, procédures pour circuits intégrés, dispositifs militaires, composants et modules pour véhicules, etc., comme cela est décrit dans les références de l'Annexe E). Dans ce cas, les valeurs lues pour les guides d'onde TEM sont utilisées pour être comparées directement avec une limite indépendante de perturbation ou à des lignes directrices, généralement développées spécifiquement pour un type de guide d'onde TEM. Dans certains cas, les limites en guide d'onde TEM peuvent être déduites des valeurs limites utilisées dans d'autres installations d'essai (voir [36]).

- Avec corrélation avec la méthode OATS

Cette approche est applicable aux EST pour lesquels les limites de perturbation sont données en terme d'amplitude de champ OATS à une distance spécifique.

Seule la seconde méthode d'essai est décrite en détail dans la présente annexe. Les essais d'émission utilisant les guides d'onde TEM exigent une validation en guide d'onde TEM pour les types d'appareils en essai afin de démontrer la bonne adaptation du guide d'onde TEM qui est utilisé. Pour chaque type d'appareil en essai, une procédure de validation doit être réalisée comme cela est décrit dans l'Article A.4. Dans les cas où seule une comparaison relative sera réalisée à l'intérieur de la même famille de produits d'appareils en essai, la corrélation avec l'OATS ou avec d'autres sites d'essai n'est pas nécessaire. Dans ce cas, les comités de produits doivent fournir des limites spécifiques pour déterminer la conformité des données de mesure.

Les algorithmes de corrélation ou de conversion sont décrits dans l'Article A.3. Les algorithmes de corrélation utilisent des mesures de tension en guide d'onde TEM pour estimer des champs OATS équivalents. Des champs en espace libre peuvent également être estimés. Ces champs, ainsi que les résultats d'essai provenant de la procédure de validation du type d'appareil en essai, peuvent ensuite être comparés aux exigences des normes. Les procédures d'essai exigent généralement que l'appareil en essai subisse une rotation dans les trois axes. C'est pourquoi l'appareil en essai doit être mécaniquement stable et indépendant de la gravité (voir 3.1.23).

NOTE Si un guide d'onde TEM ayant subi une hyper-rotation (voir [6]) est utilisé, le guide d'onde TEM est réorienté de manière à ce que son ortho-axe soit perpendiculaire à la surface de la terre. L'appareil en essai subit une rotation de $\pm 120^\circ$ autour de son axe vertical (qui est l'ortho-axe). L'appareil en essai n'a pas à subir de rotation autour de son axe horizontal. L'appareil en essai peut être sensible à la gravité.

Toutes les exigences de la présente annexe qui sont données pour les appareils en essai de petite taille ont une valeur normative. Les appareils en essai de grande taille et les considérations spécifiques concernant les montages des appareils en essai et le câblage, seront traités lors de l'élaboration de la prochaine édition de la présente norme.

Annex A (normative)

Emission testing in TEM waveguides

A.1 Introduction

This annex describes emission testing in TEM waveguides. TEM waveguide validation and correlation data should usually be supplied by the manufacturer of the TEM waveguide (Clauses A.3 and A.4). This allows the user to focus on Clauses A.5 and A.6.

Two methods are possible for determining the compliance of TEM waveguide emissions test results with a limit.

- Without correlation to the OATS method

This approach has been applied to specific product families (for example, procedures for integrated circuits, military devices, vehicle components and modules, etc., as described in the references of Annex E. In this case, TEM waveguide readings are used and compared directly to an independent disturbance limit or guideline, usually developed specifically for one type of TEM waveguide. In some cases, the TEM waveguide limits may be derived from limit values used in other test facilities (see [36]).

- With correlation to the OATS method

This approach is applicable for EUTs which have to comply with disturbance limits given in terms of an OATS field strength at a specific distance.

Only the second test method is described in detail in this annex. Emission testing using TEM waveguides requires a TEM waveguide validation for EUTs in order to demonstrate the suitability of the TEM waveguide being used. For each EUT type a validation procedure shall be carried out as described in Clause A.4. In cases where only relative comparison will be made within the same EUT product family, correlation to OATS or other test sites is not required. In that case, product committees shall supply specific limits to determine the compliance of the measurement data.

Correlation or conversion algorithms are described in Clause A.3. Correlation algorithms use TEM waveguide voltage measurements to estimate equivalent OATS field strengths. Free space field strengths may also be estimated. These field strengths, along with test results from the EUT type validation procedure, may then be compared to the requirements in normative standards. The test procedures typically require that the EUT be rotated about all three axes. Thus, the EUT needs to be mechanically stable and gravity-independent (see 3.1.23).

NOTE If a hyper-rotated TEM waveguide is used (see [6]), the TEM waveguide is reorientated so that its ortho-axis is normal to the earth's surface. The EUT is rotated by $\pm 120^\circ$ about its vertical axis (which is its ortho-axis). The EUT need not be rotated around its horizontal axis. The EUT can be gravity-dependent.

All requirements in this annex given for small EUTs are normative. Large EUTs and specific considerations regarding EUT arrangements and cabling are deferred for elaboration in the next edition of this standard.

A.2 Matériels d'essai

Le matériel d'essai doit être conforme aux exigences applicables de la CISPR 16-1.

NOTE Un capteur de champ isotrope peut être vu comme une antenne (voir la CISPR 16-1 pour les exigences pour les antennes). Les procédures d'étalonnage des sondes de champs isotropes et leurs spécifications sont décrites en [24].

A.3 Corrélation des tensions des guides d'onde TEM avec les données de champ E

A.3.1 Remarques générales

Cette procédure est destinée à établir une alternative aux méthodes d'essais d'émission en OATS. Les résultats des guides d'onde TEM sont convertis en données équivalentes de champ E OATS. Cet article décrit un algorithme fondé sur l'hypothèse selon laquelle la puissance rayonnée telle que mesurée par un guide d'onde TEM, sera rayonnée par un dipôle positionné au-dessus d'un plan de sol parfaitement conducteur. En cas de litige, c'est la méthode utilisée à l'origine, OATS ou guide d'onde TEM, qui prévaut.

Les routines de corrélation comprennent la distance entre l'appareil en essai et chaque conducteur, h_{EUT} , et l'espacement entre conducteurs h (ou séparation des plaques) (voir Figures A.6b et A.7b) dans le calcul. Ces paramètres sont analogues à la hauteur de l'appareil en essai au-dessus du sol h_g et à la séparation d'antenne s (Figure A.5) dans une mesure OATS. Les tensions mesurées avec l'appareil en essai placé dans le guide d'onde TEM sont générées par les émissions de l'appareil en essai. Après rotation (repositionnement) de l'appareil en essai conformément aux exigences de la routine de corrélation, des mesures de tension supplémentaires sont réalisées jusqu'à ce que les positions exigées aient été mesurées. La routine de corrélation utilise ensuite ces données pour simuler une mesure type OATS.

NOTE On peut trouver des informations concernant la corrélation et les données de corrélation pour la mesure d'émission en [5], [8], [17], [22], [34], [36], [40] et [41].

Le paragraphe suivant décrit uniquement un algorithme fondé sur une mesure à trois positions. D'autres algorithmes ont été proposés et peuvent être utiles pour certains appareils en essai (voir [31], [41]).

A.3.2 Algorithmes de corrélation

Les deux paragraphes A.3.2.1 et A.3.2.2 montrent des approches de corrélation différentes et indépendantes. Le paragraphe A.3.2.1 décrit l'approche de base des routines de corrélation pour le «modèle multipôle». Il utilise un jeu de mesures en guides d'onde pour déterminer les moments des multipôles équivalents. Le paragraphe A.3.2.2 décrit une autre routine de corrélation qui utilise trois mesures de tension. Cette procédure est souvent désignée sous le terme de «méthode de la puissance rayonnée totale».

A.3.2.1 Modèle multipôle

Toute source de rayonnement de taille finie peut être remplacée par un développement du multipôle équivalent qui donne le même diagramme de rayonnement à l'extérieur d'un volume limitant la source. Si la source est électriquement petite (dimensions caractéristiques inférieures à 0,1 fois la longueur d'onde), alors les premiers coefficients du développement des multipôles, en réalité des dipôles électriques et magnétiques, fourniront une simulation précise de la source. L'indication ci-dessus demeure pour une source arbitraire. Si la source elle-même se compose uniquement d'éléments tel un dipôle électrique et magnétique, alors la restriction de la taille rapportée à la longueur d'onde peut être assouplie.

A.2 Test equipment

The test equipment shall comply with the relevant requirements of CISPR 16-1.

NOTE An isotropic field sensor can be seen as an antenna (see CISPR 16-1 for antenna requirements). The calibration procedures of isotropic field probes and their specifications are described in [24].

A.3 Correlating TEM waveguide voltages to *E*-field data

A.3.1 General remarks

This procedure is intended to establish an alternative to OATS emissions test methods. The TEM waveguide results are converted to equivalent OATS *E*-field data. This clause describes an algorithm based on the assumption that the radiated power as measured by a TEM waveguide will be radiated by a dipole positioned above a perfectly conducting ground plane. In case of dispute the method originally used, either OATS or TEM waveguide, takes precedence.

Correlation routines include the distance between EUT and each conductor, h_{EUT} , and the conductor spacing h (or plate separation) at the centre of the EUT (see Figures A.6b and A.7b) in the calculation. These parameters are analogous to the EUT height over ground h_g and the antenna separation s (Figure A.5) in an OATS measurement. The voltages measured with the EUT placed in the TEM waveguide are generated by the EUT emissions. After rotation (repositioning) of the EUT according to the requirements of the correlation routine, further voltage measurements are taken until all required positions have been measured. The correlation routine then uses this data to simulate an OATS measurement.

NOTE Information about correlation and correlation data for emission measurements can be found in [5], [8] [17] [22], [34] [36], [40] and [41].

The following subclause describes only an algorithm based on a three-position measurement. Other algorithms have been proposed and may be useful for some EUTs (see [31] and [41]).

A.3.2 Correlation algorithms

The two subclauses A.3.2.1 and A.3.2.2 show different and independent correlation approaches. Subclause A.3.2.1 describes the basic approach of correlation routines for the “multipole model”. It uses a set of waveguide measurements in order to determine the equivalent multipole moments. Subclause A.3.2.2 describes another correlation routine which uses three voltage measurements. This procedure is often referred to as the “total radiated power method”.

A.3.2.1 Multipole model

Any radiation source of finite size may be replaced by an equivalent multipole expansion which gives the same radiation pattern outside a volume encompassing the source. If the source is electrically small (characteristic dimensions less than 0,1 times the wavelength), then the initial multipole expansion terms, effectively electric and magnetic dipoles, will yield an accurate simulation of the source. The above statement holds for an arbitrary source. If the source itself consists of electric and magnetic dipole-like elements only, then the size restriction with respect to the wavelength may be relaxed.

L'approche de base des routines de corrélation entre guides d'onde TEM et emplacement d'essai en espace libre ou données en espace libre, consiste à utiliser un jeu de mesures en guides d'onde TEM afin de déterminer les moments multipolaires. On utilise en général trois moments dipolaires orthogonaux à valeur complexe, exigeant six mesures ou plus. Avec la méthode de base à trois mesures, la puissance rayonnée est disponible mais pas les moments dipolaires. Une fois les moments multipolaires connus, le rayonnement en espace libre ou sur un plan de sol infini peut être simulé de manière numérique. De cette manière, il est possible de simuler les différentes configurations d'antenne source à récepteur exigées par les normes d'émission en OATS.

Pour les guides d'onde TEM à deux accès, les mesures aux deux accès produisent à la fois des informations d'amplitude et de phase relative (voir [14], [29], [30], [35] et [38]). De cette manière, il est possible de déterminer à la fois l'amplitude et la phase des moments multipolaires, et de simuler de manière précise le diagramme de rayonnement, y compris les éventuelles valeurs nulles dues à l'annulation de phase. Pour les guides d'onde TEM à un accès, aucune information de phase relative n'est disponible; ainsi, il est seulement possible de déterminer les amplitudes des moments multipolaires (voir [36], [40] et [41]). L'information de phase relative n'étant pas connue, les routines de corrélation de guide d'onde TEM à un accès partent de l'hypothèse selon laquelle les moments multipolaires rayonnent en phase. Ceci ne donne qu'une estimation de limite supérieure (voir [10], [28] et [39]). On ne peut pas simuler de diagrammes de rayonnement détaillés. L'estimation de limite supérieure est valable pour la comparaison avec les limites normales. En [31] et [32] il a été montré qu'il se produit un couplage par polarisation transversale dans les guides d'onde TEM. Les influences sur les mesures d'émissions ont été montrées dans ces documents.

A.3.2.2 Routine de corrélation de guide d'onde TEM à un accès

La routine de corrélation pour un accès se fonde sur trois mesures de tension réalisées dans un guide d'onde TEM, à partir desquelles la puissance totale rayonnée de l'appareil en essai peut être calculée. Les moments dipolaires individuels ne sont pas déterminés séparément. La puissance totale rayonnée est ensuite utilisée pour simuler les champs maximaux des appareils en essai sur un plan de sol fondé sur un modèle de dipôles parallèles (dipôle source et de réception) transmettant la même puissance totale, les deux dipôles étant horizontaux ou verticaux.

A.3.2.2.1 Mesures de tension en cellule TEM: trois positions

Les émissions des appareils en essai sont mesurées dans trois positions déterminées comme suit. Un système d'axes (x, y, z) est attribué à la cellule TEM. Un choix normal consiste à aligner l'axe z dans la direction de propagation, l'axe y parallèlement au champ E (vertical) et l'axe x parallèle au champ H . Le centre de l'appareil en essai est placé en $(x = 0, y, z)$, où $x = 0$ au milieu du septum. Un système local de coordonnées «prime» (x', y', z') est attribué à l'appareil en essai. La position a aligne x' avec x , y' avec y et z' avec z , comme indiqué à la Figure A.3. La position b est obtenue en permutant simplement les axes «prime» de l'appareil en essai: x' avec y , y' avec z et z' avec x . Ceci est équivalent à des rotations de 90° de l'appareil en essai. La position c est obtenue par une permutation supplémentaire: x' avec z , y' avec x , z' avec y . En désignant les trois mesures de tension par V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} , on peut montrer (voir [31] et [41]) que la puissance totale rayonnée P_0 due à l'appareil en essai est donnée par

The basic approach of correlation routines between TEM waveguides and open-area test site or free space data is to use a set of TEM waveguide measurements in order to determine the multipole moments. Usually three complex-valued orthogonal dipole moments are used, requiring six or more measurements. With the basic three-measurement method, radiated power is available, but not multipole moments. Once the multipole moments are known, radiation either in free space or over an infinite ground plane may be simulated numerically. In this way, it is possible to simulate the various source-to-receiver antenna configurations required by OATS emission standards.

For two-port TEM waveguides, measurements at both ports yield both amplitude and relative phase information (see [14], [29], [30], [35] and [38]). In this manner both the magnitude and the phase of the multipole moments may be determined and the radiation pattern accurately simulated, including possible nulls due to phase cancellation. For one-port TEM waveguides no relative phase information is available; thus, it is only possible to determine the magnitudes of the multipole moments (see [36], [40] and [41]). Because relative phase information is not known, one-port TEM waveguide correlation routines assume that all of the multipole moments radiate in phase. This yields an upper bound estimate only (see [10], [28] and [39]). Detailed radiation patterns cannot be simulated. The upper bound estimate is valid for comparison to standards limits. In [31] and [32] it was shown that cross-polar coupling does occur in TEM waveguides. The influences on emissions measurements have been shown there.

A.3.2.2 One-port TEM waveguide correlation routine

The one-port correlation routine is based on three voltage measurements made in a TEM waveguide from which the total radiated power of the EUT may be calculated. The individual dipole moments are not separately determined. The total radiated power is then used to simulate the maximum EUT fields over a ground plane based on a model of parallel dipoles (source and receive dipole) transmitting the same total power, either both dipoles are horizontal or vertical.

A.3.2.2.1 TEM cell voltage measurements: three positions

The EUT emissions are measured in three positions that are determined as follows. An (x,y,z) axis system is assigned to the TEM cell. A standard choice is to align the z -axis in the direction of propagation, the y -axis parallel to the E -field (vertical) and the x -axis parallel to the H -field. The centre of the EUT is placed at $(x = 0, y, z)$ with $x = 0$ in the middle of the septum. A local "primed" coordinate system (x', y', z') is assigned to the EUT. Position a aligns x' with x , y' with y , and z' with z , as indicated in Figure A.3. Position b is obtained by simply permuting the primed EUT axes: x' to y , y' to z , and z' to x . This is equivalent to two 90° rotations of the EUT. Position c is obtained by a further permutation: x' to z , y' to x , z' to y . Designating the three voltage measurements by V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} , it can be shown (see [31] and [41]) that the total radiated power P_0 due to the EUT is given by

$$P_0 = \frac{\eta_0}{3\pi} \cdot \frac{k_0^2}{e_{0y}^2 Z_C} \cdot S^2 \quad \text{en W} \quad (\text{A.1})$$

où

$$S = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2 + V_{p3}^2} \quad \text{avec } V_p \text{ en V} \quad (\text{A.2a})$$

$$S = \sqrt{10^{\frac{V_{p1}|_{dB}-120}{10}} + 10^{\frac{V_{p2}|_{dB}-120}{10}} + 10^{\frac{V_{p3}|_{dB}-120}{10}}} \quad \text{avec } V_p|_{dB} \text{ en dB}\mu\text{V} \quad (\text{A.2b})$$

et

V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} sont les mesures de tension à partir de trois positions de l'appareil en essai;

S est la racine carrée de la somme des tensions mesurées au carré, en V;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde, en $\frac{1}{m}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$ est l'impédance d'onde en espace libre, en Ω ;

Z_C est l'impédance caractéristique du guide d'onde TEM (normalement 50Ω), en Ω ;

e_{0y} est le facteur de champ: la composante y normalisée d'un champ électrique du mode TEM à l'emplacement de l'appareil en essai (pour l'Equation (A.1):

$(x = 0, y, z)$, e_{0y} en $\frac{\sqrt{\Omega}}{m}$.

NOTE Pour certains appareils en essai, il peut être nécessaire de soumettre trois positions orthogonales aux essais à chacune des quatre positions de départ (positions de départ a1, a2, a3 et a4 de la Figure A.4) pour un total de 12 positions canoniques. La valeur maximale de tension lue et les valeurs lues des deux positions orthogonales correspondantes sont ensuite utilisées dans la méthode habituelle à trois positions. Ceci constitue ce qu'on appelle la méthode «étendue à 3 positions» ou «à 12 mesures/entrées» (voir [21]).

A.3.2.2.2 Détermination du facteur de champ

L'algorithme décrit ici nécessite la composante y primaire du champ électrique du mode TEM. Des modes d'ordre supérieur ne sont pas directement couplés à la tension au niveau de l'accès. Le facteur de champ e_{0y} est la composante y normalisée du champ électrique du mode TEM à un emplacement d'essai donné de l'appareil en essai. Deux procédures sont possibles pour déduire le facteur de champ e_{0y} comme indiqué ci-dessous.

$$P_0 = \frac{\eta_0}{3\pi} \cdot \frac{k_0^2}{e_{0y}^2 Z_C} \cdot S^2, \quad \text{in W} \quad (\text{A.1})$$

where

$$S = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2 + V_{p3}^2}, \quad \text{with } V_p \text{ in V} \quad (\text{A.2a})$$

$$S = \sqrt{10^{\frac{V_{p1}|_{dB}-120}{10}} + 10^{\frac{V_{p2}|_{dB}-120}{10}} + 10^{\frac{V_{p3}|_{dB}-120}{10}}}, \quad \text{with } V_p|_{dB} \text{ in dB}\mu\text{V} \quad (\text{A.2b})$$

and

V_{p1}, V_{p2}, V_{p3} are the voltage measurements from three EUT positions;

S is the root-sum-square of measured voltages, in V;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ is the wave number, k_0 in $\frac{1}{m}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$ is the free space wave impedance, η_0 , in Ω ;

Z_C is the characteristic impedance of the TEM waveguide (typically 50 Ω) in Ω ;

e_{0y} is the field factor: the normalized y -component of the electric field of the TEM mode at the EUT location (for Equation (A.1): $(x = 0, y, z)$), e_{0y} in $\frac{\sqrt{\Omega}}{m}$.

NOTE For some EUTs, it may be necessary to test three orthogonal positions at each of four start positions (start positions a1, a2, a3 and a4 in Figure A.4) for a total of 12 canonical positions. The maximum voltage reading and the readings from the two corresponding orthogonal positions are then used in the usual three-position method. This is known as the “enhanced 3-position,” or “12 measurement/input” method (see [21]).

A.3.2.2.2 Determining the field factor

The algorithm described here requires the primary y -component of the TEM mode electric field. Higher order field modes are not directly coupled to the voltage at the port. The field factor e_{0y} is the normalized y -component of the electric field of the TEM mode at a given test location of the EUT. Two possible procedures to derive the field factor e_{0y} are as follows.

A.3.2.2.2.1 Procédure expérimentale

Le facteur de champ peut être déterminé de manière expérimentale par une mesure de la composante y du champ électrique E_y en V/m (pour une cellule vide) à l'emplacement (x,y,z) du centre de l'appareil en essai avec une puissance d'entrée connue P_i en watts

$$e_{0_y} = \frac{E_y(x,y)}{\sqrt{P_i}}, \quad \text{en } \frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}} \quad (\text{A.3})$$

Le facteur de champ e_{0_y} pour chaque type et taille de guide d'onde TEM spécifique doit être fourni par le fabricant.

A.3.2.2.2.2 Procédure analytique

Pour une cellule TEM de section asymétrique à un accès (par exemple, type GTEM), comme représentée en [41], on peut obtenir une valeur approchée de la composante de mode TEM normalisée avec l'Equation

$$e_{0_y} = \frac{4}{a} \sqrt{Z_c} \cdot \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{\cosh(My)}{\sinh(Mh)} \cdot \cos(Mx) \cdot \sin\left(M \frac{a}{2}\right) \cdot J_0(Mg) \right), \quad \text{en } \frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}. \quad (\text{A.4})$$

où

$$M = m \frac{\pi}{a}, \quad m = 1, 3, 5, \dots, \infty, \quad \text{en } 1/\text{m}$$

a est la largeur de cellule (voir Figures A.6 – A.9), en m;

h est la hauteur du septum, en m;

g est la largeur d'espacement, en m;

x,y,z est l'emplacement du centre de l'EST, en m;

J_0 est la fonction Bessel d'ordre zéro, J_0 sans unité.

Seuls quelques termes de cette série doivent être pris en compte pour une approximation correcte de e_{0_y} . Des résultats de calculs généraux sont donnés en [28].

A.3.2.3 Corrélation avec un OATS

Les émissions de l'appareil d'essai selon la méthode en OATS sur un plan de sol dans des conditions de champ lointain, sont simulées en partant de l'hypothèse que la même puissance totale rayonnée, telle qu'elle est mesurée dans le guide d'onde TEM, est émise par un dipôle court (qui remplace l'appareil en essai). Les équations relatives aux champs provenant d'un dipôle sont bien connues, et le plan de sol peut être pris en compte en introduisant un dipôle image. Les champs peuvent être calculés sur le balayage en hauteur équivalent de l'antenne de réception, comme cela est exigé par la méthode en OATS. Le signal maximal provenant des deux polarisations donnerait alors le champ maximal possible. En utilisant le facteur de géométrie $g_{\max}$ déterminé par un balayage en hauteur de l'antenne de réception, une valeur estimée pour le champ maximal $E_{\max}$ sur un OATS est donnée par

$$E_{\max} = g_{\max} \cdot \sqrt{\frac{3\eta_0}{4\pi} P_0}, \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.5})$$

A.3.2.2.2.1 Experimental procedure

The field factor can be determined experimentally via a measurement of the y -component of the electric field E_y in V/m (for an empty cell) at the location (x,y,z) of the EUT centre with a known input power P_i in watts

$$e_{0_y} = \frac{E_y(x,y)}{\sqrt{P_i}} \quad \text{in } \frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}} \quad (\text{A.3})$$

The e_{0_y} field factor for each specific type and size of TEM waveguide shall be provided by the manufacturer.

A.3.2.2.2.2 Analytical procedure

For a one-port TEM cell with asymmetric cross-section (for example, GTEM type), as shown in [41] the normalized TEM mode component can be analytically approximated with the equation

$$e_{0_y} = \frac{4}{a} \sqrt{Z_c} \cdot \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{\cosh(My)}{\sinh(Mh)} \cdot \cos(Mx) \cdot \sin\left(M \frac{a}{2}\right) \cdot J_0(Mg) \right), \quad \text{in } \frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}} \quad (\text{A.4})$$

where

$M = m \frac{\pi}{a}$, $m = 1, 3, 5, \dots, \infty$, in 1/m;

a is the cell width (see Figures A.6 – A.9), in m;

h is the septum height, in m;

g is the gap width, in m;

x,y,z is the location of the EUT centre, in m;

J_0 is the zero-order Bessel function, J_0 without unit.

Only a few terms of this series need to be retained for a good approximation of e_{0_y} . General calculation results are given in [28].

A.3.2.3 Correlation to OATS

OATS method EUT emissions over a ground plane under far-field conditions are simulated by assuming that the same total radiated power, as measured in the TEM waveguide, is emitted by a short dipole (replacing the EUT). The equations for the fields from a dipole are well known and the ground plane may be accounted for by introducing an image dipole. The fields may be calculated over the equivalent height scan of the receiving antenna as required by the OATS method. The maximum signal from the two polarizations would then give the maximum possible field strength. Using the geometry factor $g_{\max}$ determined by the height-scan of the receiving antenna, an estimate for the maximum field $E_{\max}$ on an OATS is given by

$$E_{\max} = g_{\max} \cdot \sqrt{\frac{3\eta_0}{4\pi} P_0}, \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.5})$$

$$E_{\max} = g_{\max} \cdot \frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{0y}} \cdot \frac{S}{\sqrt{Z_C}}, \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.6})$$

où

S est déterminé par l'Equation (A.2), en V;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ est déterminé par l'Equation (A.2), en $\frac{1}{\text{m}}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega = 377\Omega$ est déterminé par l'Equation (A.2), en Ω ;

Z_C est déterminé par l'Equation (A.2), en Ω ;

e_{0y} est déterminé par l'Equation (A.2), en $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$

et

$$g_{\max} = \begin{cases} \left| \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\max} = \left| \frac{1}{r_1 r_2} [r_2^2 + r_1^2 - 2r_1 r_2 \cos k_0(r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\max} & \text{polarisation horizontale} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\max} = \left| \frac{s^2}{r_1^3 r_2^3} [r_2^6 + r_1^6 + 2r_1^3 r_2^3 \cos k_0(r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\max} & \text{polarisation verticale} \end{cases}$$

où $g_{\max}$ est exprimé en $\frac{1}{\text{m}}$ (A.7)

avec les paramètres suivants comme les montre la Figure A.5:

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_H - h_g)^2}$ est la distance appareil en essai à antenne de réception, en m;

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_H + h_g)^2}$ est la distance image de l'appareil en essai à antenne de réception, en m;

s est la distance antenne de réception à appareil en essai comme indiqué dans les normes (Normalement, cette valeur, exprimée en mètres, est de 30 m, 10 m ou 3 m);.

h_g est la hauteur de l'appareil en essai au-dessus du plan de sol, en m;

R_H est la hauteur de l'antenne de réception au-dessus du plan de sol, en m (Normalement cette valeur est balayée sur la plage 1 m à 4 m);

NOTE 1 Le champ électrique maximal en espace libre, en zone lointaine à une distance r est donné par

$E_{\max} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi}} D_{\max} P_0$, où $D_{\max}$ est la directivité maximale de l'antenne. L'Equation (A.5) vient du réglage de $D_{\max}$ à 3 et de la prise en compte de l'antenne d'image et de la distance r via le facteur de géométrie $g_{\max}$. La valeur 3 est une limite supérieure pour une petite antenne et provient de la présence d'un dipôle électrique et d'un dipôle magnétique tous les deux orientés, et avec une phase permettant d'obtenir une directivité maximale. Pour un dipôle électrique ou magnétique seul, $D_{\max} = 1.5$. Il s'agit du cas le plus probable pour un radiateur involontaire dans la mesure où il convient qu'un seul type de source soit dominant. Dans ce sens, l'Equation (A.5) peut être considérée comme le «cas le plus défavorable».

Généralement D est donnée soit par une valeur hypothétique soit par une valeur connue *a priori*, soit par la directivité mesurée de l'appareil en essai. L'algorithme de corrélation de guide d'onde TEM à un accès a toujours eu comme hypothèse une valeur approchée du «cas le plus défavorable» basée sur a) la puissance totale rayonnée sur volume ou cône de balayage OATS et b) le choix implicite de directivité du cas le plus défavorable. Pour une comparaison avec d'autres méthodes d'essai d'émissions de puissance totale rayonnée, par exemple chambres réverbérantes, des directivités de $D = 1.5$ ou $D = 1.7$ peuvent être utilisées. Pour les besoins du présent document, il a été décidé d'utiliser une directivité de petit appareil en essai «cas le plus défavorable» avec $D = 3$.

$$E_{\max} = g_{\max} \cdot \frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{0y}} \cdot \frac{S}{\sqrt{Z_C}}, \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.6})$$

where

S is defined by Equation (A.2), in V;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ see Equation (A.2), in $\frac{1}{\text{m}}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega = 377\Omega$ see Equation (A.2), in Ω ;

Z_C see Equation (A.2), in Ω ;

e_{0y} see Equation (A.2), in $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$

and

$$g_{\max} = \begin{cases} \left| \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\max} = \left| \frac{1}{r_1 r_2} [r_2^2 + r_1^2 - 2r_1 r_2 \cos k_0 (r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\max} & \text{horizontal polarization} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\max} = \left| \frac{s^2}{r_1^3 r_2^3} [r_2^6 + r_1^6 + 2r_1^3 r_2^3 \cos k_0 (r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\max} & \text{vertical polarization} \end{cases}$$

$$g_{\max} \text{ in } \frac{1}{\text{m}} \quad (\text{A.7})$$

with the following parameters as shown in Figure A.5:

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_H - h_g)^2}$ distance EUT to receiving antenna, in m;

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_H + h_g)^2}$ distance image of EUT to receiving antenna, in m;

s receiving antenna to EUT distance as designated in normative standards.
Normally this value is 30 m, 10 m or 3 m, in m;

h_g height of EUT above ground plane, in m;

R_H height of receiving antenna above ground plane, in m.
Normally this value is scanned over the range 1 m to 4 m.

NOTE 1 The maximum free-space, far-zone electric field at a distance r is given by $E_{\max} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi}} D_{\max} P_0$,

where $D_{\max}$ is the maximum directivity of the antenna. Equation (A.5) follows from setting $D_{\max}$ equal to 3 and accounting for the image antenna and distance r via the geometry factor $g_{\max}$. The value 3 is an upper limit for a small antenna and follows from the presence of an electric and a magnetic dipole both orientated and phased for maximum directivity. For an electric or magnetic dipole alone $D_{\max} = 1.5$. This is the more likely case for an unintentional radiator since one source type should be dominant. In this sense, Equation (A.5) may be viewed as “worst case”.

Generally D is given by either an assumed value, or a value known *a priori*, or the measured directivity of the EUT. The one-port TEM waveguide correlation algorithm has always assumed a “worst-case” estimate based on a) total radiated power versus the OATS scanning volume or cone and b) the implicit worst-case directivity choice. For comparison with other total radiated power emissions test methods, for example, reverberation chambers, directivities of $D = 1.5$ or $D = 1.7$ may be used. For the purposes of this document, it has been agreed to use a “worst-case” small-EUT directivity of $D = 3$.

NOTE 2 Cette corrélation est valable pour les appareils en essai de petite taille comme défini en 5.1. Des lignes directrices pour la corrélation des appareils en essai de grande taille et des méthodes de montage sont données dans ce document, à titre indicatif. Des détails complets, concernant les méthodes de corrélation pour des appareils en essai de grande taille seront inclus dans la prochaine édition de cette norme.

NOTE 3 Pour les classes de produits ayant approximativement les mêmes taille (facteur de forme) et fonctionnalité, une comparaison complète guide d'onde TEM – OATS est réalisée en utilisant un produit représentatif de cette classe. Cette comparaison forme une référence, de telle sorte que seuls les essais de guide d'onde TEM sont nécessaires pour d'autres produits dans cette classe spécifique de produit.

NOTE 4 Une autre corrélation possible concerne l'espace libre. Pour le cas de l'espace libre ou d'une chambre complètement anéchoïque équivalente, les termes de la réflexion due au plan de sol (indice 2 dans l'Equation (A.7)) sont omis.

Sinon $E_{\max}$ peut être exprimé en termes de dB μ V/m comme

$$E_{\max}|_{dB} = 20 \cdot \lg(g_{\max}) + 10 \cdot \lg(P_0) + 139,5 \quad \text{en dB} \frac{\mu V}{m} \quad (A.8)$$

Le facteur $20 \cdot \lg(g_{\max})$ peut être calculé chaque fois ou interpolé à partir des tableaux de référence pré-calculés pour les géométries normalisées.

$E_{\max}$ peut également être exprimé en fonction des tensions mesurées. L'insertion de P_0 à partir de l'Equation (A.1), et de S à partir de l'Equation (A.2) dans l'Equation (A.5), et la conversion en dB(μ V/m), conduit à:

$$E_{\max}|_{dB} = 20 \cdot \lg(g_{\max}) + 20 \cdot \lg\left(\frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{oy}}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{S^2}{Z_c}\right) + 120 \quad \text{en dB} \frac{\mu V}{m} \quad (A.9)$$

A.4 Procédure de validation pour l'utilisation en émission des guides d'onde TEM

A.4.1 Procédure de validation

Un guide d'onde TEM à utiliser pour les essais d'émission doit satisfaire aux exigences de validation décrites dans cet article et dans l'Article 5. Il est recommandé que la validation soit complétée par le fabricant pour chaque type et chaque taille de guide d'onde TEM.

A.4.2 Exigences de validation de guide d'onde TEM pour appareils en essai de petite taille et pour appareils en essai de grande taille

L'essai de validation doit être réalisé en utilisant un jeu de sources d'émissions de référence ayant des réponses en émission selon la méthode OATS bien caractérisées. Les sources de référence sont choisies sur la base des types d'appareils (Article 7) qui seront soumis aux essais dans le guide d'onde TEM. Quatre types de sources de référence sont recommandés pour représenter des applications CEM générales. Ils représentent des variantes de matériels de table comme défini dans la CISPR 22.

- a) Un générateur de peigne alimenté par batterie avec une antenne à large bande, qui est un exemple d'appareil en essai de petite taille. La dimension la plus importante du générateur de peigne doit être inférieure à $0,1 h$, où h est l'espacement entre conducteurs. S'il n'existe aucun générateur de peigne sur le marché satisfaisant à l'exigence de taille, un générateur de peigne allant jusqu'à $0,35 h$ peut être utilisé. Dans ce cas, la taille et le type du générateur de peigne utilisé et la taille régulièrement autorisée ($0,1 h$), sont indiqués à la même position du protocole d'essai et sont marqués spécialement. Il convient que la taille de l'appareil en essai soit inférieure à une longueur d'onde à la fréquence la plus élevée essayée (voir 6.1).

NOTE Les émetteurs de bruit à large bande (comme le CNE) seront étudiés dans la prochaine édition de la présente norme.

NOTE 2 This correlation is valid for small EUTs as defined in 5.1. Some informative guidance for large EUT correlation and set-up methods is included in this standard. Complete details of correlation methods for large EUTs will be included in the next edition of this standard.

NOTE 3 For product classes having approximately the same size (form factor) and functionality, a full TEM waveguide to OATS comparison is made using a representative product from that class. This comparison forms a reference so that only TEM waveguide testing is needed for other products within that specific product class.

NOTE 4 Another possible correlation is to free space. For the free space case, or an equivalent fully anechoic chamber, the reflection terms caused by the ground plane (subscript 2 in Equation (A.7)) are omitted.

Alternately $E_{\max}$ may be expressed in terms of dB μ V/m as

$$E_{\max}|_{dB} = 20 \cdot \lg(g_{\max}) + 10 \cdot \lg(P_0) + 139,5 \quad \text{in dB} \frac{\mu V}{m} \quad (A.8)$$

The factor $20 \cdot \lg(g_{\max})$ may be calculated each time, or interpolated from pre-calculated look-up tables for standard geometries.

$E_{\max}$ can also be expressed as a function of the measured voltages. The insertion of P_0 from Equation (A.1) and S from Equation (A.2) into Equation (A.5) and conversion to dB μ V/m leads to

$$E_{\max}|_{dB} = 20 \cdot \lg(g_{\max}) + 20 \cdot \lg\left(\frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{oy}}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{S^2}{Z_c}\right) + 120 \quad \text{in dB} \frac{\mu V}{m} \quad (A.9)$$

A.4 Validation procedure for emissions use of TEM waveguides

A.4.1 Validation procedure

A TEM waveguide to be used for emissions testing shall fulfil the validation requirements described in this clause and in Clause 5. It is recommended that the validation be completed by the manufacturer for each type and size of TEM waveguide.

A.4.2 TEM waveguide validation requirements for small and large EUTs

The validation test is to be performed using a set of reference emission sources with well-characterized OATS-method emission responses. The reference sources are selected on the basis of the types of EUTs (Clause 7) that will be tested in the TEM waveguide. Four types of reference sources are recommended to represent general EMC applications. These represent variations of table-top equipment as defined in CISPR 22.

- a) A battery-powered comb generator with a broadband antenna, which is an example of a small EUT. The largest dimension of the comb generator shall be smaller than $0,1 h$, where h is the conductor spacing. If there is no comb generator available on the market that fulfils the size requirement, a comb generator up to $0,35 h$ may be used. In this case the size and type of the used comb generator and the regularly allowed size ($0,1 h$) are stated at the same position of the test protocol and are marked specially. The EUT case should be smaller than 1 wavelength at the highest frequency tested (see 6.1).

NOTE Broadband noise emitters (like the CNE) will be considered in the next edition of this standard.

- b) Un générateur de peigne alimenté par batterie avec un fil fixé, qui est un exemple d'appareil d'essai de grande taille sans câbles de sortie. Il convient que le fil fixé aille jusqu'au bord du volume d'essai utilisable mais reste à l'intérieur de celui-ci.
- c) Un générateur de peigne alimenté par batterie avec un fil de sortie fixé, qui est un exemple d'appareil d'essai de grande taille avec câbles de sortie. Le fil fixé va jusqu'à une pince de ferrite et la traverse.
- d) Une boîte de 19 U (480 mm) avec générateur de peigne incorporé, avec au moins deux câbles de sortie, prévu pour être un exemple d'appareil en essai de grande taille avec câbles de sortie.

Pour chacun des exemples d'appareils en essai ci-dessus, le générateur de peigne doit produire des raies spectrales tous les 10 MHz ou moins sur toute la gamme de fréquences considérée. Les raies spectrales doivent être stables avec des variations inférieures à 1 dB pendant la durée d'essai de validation.

NOTE Si la plus grande dimension du générateur de peigne est inférieure à $0,1 h$, on peut s'attendre à une perturbation minimale du mode TEM.

Pour les fabricants de guides d'onde TEM de types et de tailles spécifiques, il est recommandé que les essais d'émission soient réalisés en utilisant les exemples d'appareils en essai dans quatre guides d'onde TEM ou plus, de même type et de même taille, et quatre, voire davantage, OATS différents. Les résultats sont valables pour tous les guides d'onde TEM de même type et de même taille. Un montage identique d'appareils en essai similaires, avec fonction de détection et de réception, temps de palier et bande passante identiques, doit être utilisé à toutes les fréquences et sur chaque emplacement d'essai. L'algorithme de corrélation à trois positions doit être appliqué pour convertir les tensions mesurées avec le guide d'onde TEM en valeurs de champ OATS.

A.4.2.1 Exigences de validation de guide d'onde TEM pour appareils en essai de petite taille

Pour valider un guide d'onde TEM en vue de son utilisation pour des appareils en essai de petite taille, les essais doivent être réalisés en utilisant l'appareil en essai utilisé comme exemple, qui représente un appareil en essai de petite taille, à savoir le générateur de peigne à antenne à large bande alimenté par batterie.

A.4.2.1.1 Installation des appareils en essai de petite taille

Les essais sont réalisés dans un guide d'onde TEM en appliquant une séquence d'essais spécifique avec comme exemple l'appareil en essai de petite taille. L'appareil en essai est placé au centre du volume d'essai, par exemple sur un support du montage d'essai, et il est tourné autour de l'ortho-axe selon un minimum de trois positions orthogonales (voir Figure A.2). Dans certains cas, l'utilisation d'un cube non-conducteur destiné à envelopper l'appareil en essai fixé ou l'utilisation d'un manipulateur peut aider aux rotations.

A.4.2.1.2 Calcul du facteur de correction pour les appareils en essai de petite taille

Dans le cas de l'exemple d'un appareil en essai de petite taille, un facteur de correction statistique a été vu, pour améliorer l'accord entre amplitudes de champs en OATS, et en guide d'onde TEM obtenus par algorithme de corrélation à trois positions.

NOTE La mesure d'émission dans les guides d'onde TEM est fondée sur la méthode de puissance totale rayonnée. C'est pourquoi toutes les orientations possibles sont examinées. Lorsqu'on compare les données OATS avec les mesures en guide d'onde TEM, l'opérateur choisira l'orientation de l'appareil en essai sur l'OATS avec l'émission maximale.

Le calcul du facteur de correction est fondé sur les différences de l'écart moyen et de l'écart type, à la fois pour les champs corrélés des guides d'onde TEM et pour ceux mesurés avec la méthode OATS, à chaque fréquence. Un facteur de correction du diagramme de rayonnement complémentaire a été identifié pour améliorer l'accord entre les résultats du guide d'onde TEM et de l'OATS pour l'appareil en essai de petite taille servant d'exemple. Le facteur de correction c_f à chaque fréquence f est calculé en utilisant

- b) A battery-powered comb generator with a wire attached, which is an example of a large EUT without exit cables. The attached wire should extend to the edge of, but remain within, the usable test volume.
- c) A battery-powered comb generator with an attached exit cable, which is an example of a large EUT with exit cables. The attached wire runs to and through a ferrite clamp.
- d) A 19U (480 mm) case with a built-in comb generator, with at least two exit cables, intended to be an example of a large EUT with exit cables.

For each of the above examples of EUTs, the comb generator shall produce spectral lines every 10 MHz or less over the entire frequency range of interest. The spectral lines shall be stable with variations of less than 1 dB during the validation test duration.

NOTE If the largest dimension of the comb generator is smaller than $0,1 h$, minimal perturbation of the TEM mode can be assumed.

For manufacturers of specific TEM waveguide types and sizes, it is recommended that emission tests be performed using the examples of EUTs in four or more TEM waveguides of the same type and size, and four or more different OATS. The results are valid for all TEM waveguides of the same type and size. An identical EUT arrangement, receiver detector function, dwell time, and bandwidth shall be used at all frequencies and at each test site. The three-position correlation algorithm shall be applied to convert the TEM waveguide-measured voltages into OATS field strength values.

A.4.2.1 TEM waveguide validation requirements for small EUTs

To validate a TEM waveguide for use with small EUTs, testing shall be performed using the example of the EUT that represents a small EUT, namely the battery-powered comb generator with broadband antenna.

A.4.2.1.1 Arrangement of small EUTs

Tests are performed using a specific test sequence with the example of a small EUT in a TEM waveguide. The EUT is placed in the centre of the test volume, for example on a test set-up support, and turned to a minimum of three orthogonal positions around the ortho-axis (see Figure A.2). In some cases, the use of a non-conductive cube to enclose the affixed EUT, or use of a manipulator, may assist with the rotations.

A.4.2.1.2 Calculation of the small-EUT correction factor

In the case of the example of the small EUT, a statistical correction factor has been seen to improve the agreement between OATS and three-position correlation algorithm TEM waveguide field strengths.

NOTE The emission measurement in TEM waveguides is based on the total radiated power method. Therefore, all possible orientations are regarded. When comparing OATS data with TEM waveguide measurements, the operator must select the orientation of the EUT on the OATS with the maximum emission.

The correction factor calculation is based on the differences of the average and standard deviation of both the TEM waveguide-correlated and the OATS-measured field strengths at each frequency. An additional radiation pattern correction factor has also been seen to improve agreement between OATS and TEM waveguide results for the example small EUT. The correction factor c_f at each frequency f is calculated using

$$c_f = \bar{x}_f - d_{s,f} - t \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.10})$$

où

$\bar{x}_f$ est la différence moyenne entre les amplitudes des champs en guide d'onde TEM et en OATS, en $\frac{V}{m}$;

$d_{s,f}$ est la différence des écarts types des valeurs multiples lues en guide d'onde TEM et en OATS (Equation (A.12)), en $\frac{V}{m}$;

t est le facteur d'incertitude du diagramme de rayonnement (Equation (A.18)), en $\frac{V}{m}$.

NOTE Même un appareil en essai de petite taille peut ne pas avoir de diagramme de rayonnement isotrope. Il convient que cette différence soit prise en compte par le facteur t dans l'Equation (A.10). Les mesures sur différents OATS et dans différents guides d'onde TEM peuvent également donner lieu à des écarts. Ceci est pris en compte par $d_{s,f}$ dans l'Equation (A.10). L'ordre d'amplitude de t et de $d_{s,f}$ est typiquement de 1 dB.

La différence moyenne des amplitudes de champs à chaque fréquence est donnée par

$$\bar{x}_f = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \right) \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.11})$$

où

$g_{i,f}$ est le champ électrique de guide d'onde TEM corrélé avec le champ libre (A.3.2.3), en $\frac{V}{m}$;

$i = 1 \dots n$, n étant le nombre de mesures en guides d'onde TEM;

$o_{k,f}$ est le champ électrique OATS, en $\frac{V}{m}$;

$k = 1 \dots m$, m étant le nombre de mesures OATS;

f est la fréquence, en Hz;

$g_{i,f}$ sont les champs corrélés des mesures $i = 1 \dots n$ en utilisant un ou plusieurs guides d'onde TEM de type et de taille spécifiques, et

$o_{k,f}$ correspond aux résultats des mesures de $k = 1 \dots m$, en utilisant un ou plusieurs OATS.

La différence des écarts types des valeurs multiples lues du guide d'onde TEM et de l'OATS est donnée par

$$d_{s,f} = s_{TEM,f} - s_{OATS,f} \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.12})$$

Ici $s_{TEM,f}$ est l'écart type des valeurs multiples d'amplitudes de champ du guide d'onde TEM, donné par

$$s_{TEM,f} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_{i,f} - \bar{g}_f)^2}{n-1}} \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.13})$$

$$c_f = \bar{x}_f - d_{s,f} - t \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.10})$$

where

$\bar{x}_f$ is the average difference between the TEM waveguide and the OATS field strengths, in $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$d_{s,f}$ is the difference of standard deviations of multiple TEM waveguide and OATS readings (Equation (A.12)), in $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

t is the radiation pattern uncertainty factor (Equation (A.18)), in $\frac{\text{V}}{\text{m}}$.

NOTE Even a small EUT may not have an isotropic radiation pattern. This difference should be taken into account by the factor t in Equation (A.10). Measurements on different OATS and in different TEM waveguides may result in deviations also. This is taken into account by $d_{s,f}$ in Equation (A.10). The typical order of magnitude of t and $d_{s,f}$ is 1 dB.

The average difference of the field strengths at each frequency is given by

$$\bar{x}_f = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \right) \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.11})$$

where

$g_{i,f}$ is the TEM waveguide electric field strength correlated with free field (A.3.2.3), in $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$i = 1 \dots n$ n is the number of TEM waveguide measurements;

$o_{k,f}$ is the OATS electric field strength, in $\frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$k = 1 \dots m$ m is the number of OATS measurements;

f is the frequency, in Hz;

$g_{i,f}$ are the correlated field strengths from $i = 1 \dots n$ measurements using one or more TEM waveguides of a specific type and size, and

$o_{k,f}$ are the results from $k = 1 \dots m$ measurements using one or more different OATS.

The difference of the standard deviations of the multiple TEM waveguide and OATS readings is given by

$$d_{s,f} = s_{TEM,f} - s_{OATS,f}, \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}}. \quad (\text{A.12})$$

Here $s_{TEM,f}$ is the standard deviation of the TEM waveguide multiple field strength values, given by

$$s_{TEM,f} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_{i,f} - \bar{g}_f)^2}{n-1}}, \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}}, \quad (\text{A.13})$$

et $s_{OATS,f}$ est l'écart type des résultats d'un ou de plusieurs OATS, donné par

$$s_{OATS,f} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (o_{k,f} - \bar{o}_f)^2}{m-1}} \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.14})$$

Dans ces équations d'écart type, la moyenne des niveaux de chaque guide d'onde TEM et de chaque OATS est donnée par

Guide d'onde TEM: $\bar{g}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.15})$

OATS : $\bar{o}_f = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \quad o_{k,f} \text{ en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.16})$

NOTE Si le guide d'onde TEM est unique ($n = 1$), par exemple construit pour utilisation scientifique dans un seul laboratoire, alors $s_{TEM,f} = 0$ pour la détermination du facteur de correction de ce guide d'onde spécifique. C'est pourquoi ces résultats ne peuvent pas être utilisés pour la validation d'un autre guide d'onde TEM, même de même type et de même taille.

Pour chaque guide d'onde TEM spécifique, le facteur d'incertitude du diagramme de rayonnement t est déduit d'une série d'essais de corrélation à trois positions effectués par exemple à partir de huit positions de départ $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ et 315° . Par exemple, pour la position de départ de la Figure A.4.a1 ($xx' yy' zz'$), l'appareil en essai subit une rotation selon ces angles autour de l'axe y . A chaque position de départ, la méthode de corrélation à trois positions est utilisée pour produire en additionnant une série de huit valeurs de champs corrélées désignées E_α ($8 \times 3 = 24$ valeurs lues de tension). $\bar{E}_\alpha$ est la valeur moyenne du champ électrique, spécifiquement, $\bar{E}_{0^\circ} = (E_{0^\circ} + E_{90^\circ})/2, \dots, \bar{E}_{225^\circ} = (E_{225^\circ} + E_{315^\circ})/2$. Un champ maximal, $E_{\alpha,\max}$, est obtenu comme étant le champ le plus élevé pour chaque paire de valeurs séparées de 90° . Spécifiquement, $E_{0^\circ,\max} = \max(E_{0^\circ}, E_{90^\circ}), \dots, E_{225^\circ,\max} = \max(E_{225^\circ}, E_{315^\circ})$. Un facteur d'écart type est calculé en utilisant l'Equation (A.17).

NOTE Pour l'Equation (A.15) un incrément de 45° a été choisi comme exemple.

$$t_{90^\circ,f} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=0^\circ \cap 90^\circ}^{225^\circ \cap 315^\circ} (E_{\alpha,\max} - \bar{E}_\alpha)^2}{l-1}} \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.17})$$

où l est le nombre de positions de départ (huit dans l'exemple ci-dessus).

Le facteur d'incertitude final du diagramme de rayonnement t est obtenu comme la moyenne de ceux-ci, ou

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{90^\circ,f})_i \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A.18})$$

NOTE Une alternative au facteur t (facteur d'incertitude de diagramme de rayonnement) peut être la méthode à six positions de [27] ou la méthode à douze positions («trois positions étendues») de [37]. L'aspect important est la nécessité de capter la puissance totale rayonnée de l'appareil en essai. Des données de comparaison sont représentées en [20] et [21].

and $s_{OATS,f}$ is the standard deviation of the results from one or multiple OATS, given by

$$s_{OATS,f} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (o_{k,f} - \bar{o}_f)^2}{m-1}} \quad \text{in } \frac{V}{m} \quad (\text{A.14})$$

In these standard deviation equations, the mean of each the TEM waveguide and the OATS levels are given by

TEM waveguide:
$$\bar{g}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} \quad \text{in } \frac{V}{m} \quad (\text{A.15})$$

OATS:
$$\bar{o}_f = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \quad o_{k,f} \text{ in } \frac{V}{m} \quad (\text{A.16})$$

NOTE If the TEM waveguide is unique ($n = 1$), for example, built for scientific use in a single laboratory, then $s_{TEM,f} = 0$ for the determination of the correction factor of this specific waveguide. Therefore, these results cannot be used for the validation of any other TEM waveguide, even of the same type and size.

For each specific TEM waveguide, the radiation pattern uncertainty factor t is derived from a series of three-position correlation tests made at eight starting positions of 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , and 315° , for example. For instance, for the start position of Figure A.4.a1 (xx'yy'zz'), the EUT is rotated to these angles around the y-axis. At each start position, the three-position correlation method is used to yield in sum a series of eight correlated field strength values designated E_α ($8 \times 3 = 24$ voltage readings). $\bar{E}_\alpha$ is the mean value of the electric field, specifically, $\bar{E}_{0^\circ} = (E_{0^\circ} + E_{90^\circ})/2, \dots, \bar{E}_{225^\circ} = (E_{225^\circ} + E_{315^\circ})/2$. A maximum field strength, $E_{\alpha,\max}$, is obtained as the highest field strength for each pair of values separated by 90° . Specifically, $E_{0^\circ,\max} = \max(E_{0^\circ}, E_{90^\circ})$, $\dots, E_{225^\circ,\max} = \max(E_{225^\circ}, E_{315^\circ})$. A standard deviation factor is calculated using the following equation.

NOTE For Equation (A.15) an increment of 45° has been chosen as an example.

$$t_{90^\circ,f} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=0^\circ \cap 90^\circ}^{225^\circ \cap 315^\circ} (E_{\alpha,\max} - \bar{E}_\alpha)^2}{I-1}}, \quad \text{in } \frac{V}{m} \quad (\text{A.17})$$

where I is the number of start positions (eight in the above example).

The final radiation pattern uncertainty factor t is obtained as the average of these, or

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{90^\circ,f})_i, \quad \text{in } \frac{V}{m} \quad (\text{A.18})$$

NOTE An alternative to the t -factor (radiation pattern uncertainty factor) may be the six-position method of [27], or the 12-position method ("enhanced three-position") of [37]. The important issue is that EUT total radiated power must be captured. Comparison data are shown in [20] and [21].

A.4.2.2 Exigences de validation de guide d'onde TEM pour appareils en essai de grande taille

Pour la validation d'un guide d'onde TEM pour une utilisation avec des appareils en essai de grande taille, les procédures d'essai et les facteurs de correction sont à l'étude et seront traités dans la prochaine édition de la présente norme.

A.5 Procédures de mesures d'émission dans les guides d'onde TEM

A.5.1 Types d'appareils en essai

A.5.1.1 Appareils en essai de petite taille dans les guides d'onde TEM

Un appareil en essai de petite taille doit être soumis aux essais en utilisant deux positions de départ dans le guide d'onde TEM. La première position de départ est arbitraire, tandis que la deuxième est la première position de départ après rotation comme représenté à la Figure A.4. Pour chaque position de départ, les rotations d'algorithme de corrélation sont réalisées. Par exemple, la méthode à trois positions de A.3.2.2.1 exige que trois orientations soient mesurées. Cette procédure doit être réalisée avec les positions de départ a1 et a3, ou a2 et a4 de la Figure A.4 (un total de $2 \times 3 = 6$ positions). Le champ corrélé le plus élevé de ces deux jeux de données doit être noté à chaque fréquence.

NOTE La gamme de fréquences est déterminée par la limite applicable ou l'objectif d'essai, généralement 30 MHz à 1 GHz pour des appareils en essai de petite taille. La gamme de fréquences utilisable est déterminée dans les essais de vérification du mode TEM (voir 5.1.1, 5.2.2).

A.5.1.2 Appareils en essai de grande taille sans câbles

La méthode de la section A.5.1.1 peut être utilisée pour obtenir des données relatives pour des appareils en essai de grande taille sans câbles.

A.5.1.3 Appareils en essai de grande taille avec câbles

A l'étude.

NOTE Dans les plages de fréquences plus basses (par exemple, inférieures à 100 MHz), il peut être nécessaire de mesurer les émissions conduites (inférieures à 30 MHz, CISPR 22) et la puissance de perturbation rayonnée (CISPR 14), aussi pour caractériser complètement un appareil en essai avec câbles connectés.

A.5.2 Montage de l'appareil en essai

Des caractéristiques et descriptions spécifiques complémentaires des montages des appareils en essai sont différées à la prochaine édition de la présente norme. Les informations suivantes sont données à titre indicatif.

L'appareil en essai est placé au centre du volume d'essai utilisable (5.1.2) sur un manipulateur (3.1.21 et Figures A.1, A.2b et c) ou sur un support du montage d'essai (3.1.16).

Les appareils en essai de petite taille sans câbles doivent être fixés au centre de rotation du manipulateur. En utilisant le manipulateur, l'appareil en essai subit une rotation autour du centre électrique (qui peut être supposé comme étant identique au centre géométrique de l'appareil en essai).

Pour les appareils en essai avec câble(s) le routage de câbles suivant s'applique. Les câbles longs doivent être disposés en faisceaux conformément aux règles se trouvant en 7.2.5.2 de la CISPR 16-2-3. Le ou les câbles d'interconnexion doivent être posés de manière perpendiculaire à chaque boîtier. Pour obtenir des résultats de mesure reproductibles, les positions relatives du ou des câbles d'interconnexion et de l'appareil en essai ne doivent pas changer au cours de l'algorithme de corrélation à trois positions. Si le ou les câbles sont trop longs, le ou les câbles d'interconnexion peuvent être disposés en faisceau selon 7.2.5.2 de la CISPR 16-2-3.

A.4.2.2 TEM waveguide validation requirements for large EUTs

For the validation of a TEM waveguide for use with large EUTs, the test procedures and correction factors are under consideration, and are the subject of the next edition of this standard.

A.5 Emission measurement procedures in TEM waveguides

A.5.1 EUT types

A.5.1.1 Small EUTs in TEM waveguides

A small EUT shall be tested using two start positions in the TEM waveguide. The first start position is arbitrary, while the second start position is the first start position rotated as shown in Figure A.4. For each start position, the applicable correlation algorithm EUT rotations are performed. For example, the three-position method of A.3.2.2.1 requires that three orientations be measured. This procedure shall be carried out with start position a1 and a3, or a2 and a4 of Figure A.4 (a total of $2 \times 3 = 6$ positions). The highest correlated field strength from these two data sets shall be reported at each frequency.

NOTE The frequency range is determined by the applicable limit or test objective, usually 30 MHz to 1 GHz for small EUTs. The usable frequency range is determined in the TEM mode verification tests (see 5.1.1, 5.2.2).

A.5.1.2 Large EUTs without cables

The method of A.5.1.1 can be used to get relative data for large EUTs without cables.

A.5.1.3 Large EUTs with cables

Under consideration.

NOTE In the lower frequency ranges (for example, less than 100 MHz), it may be necessary to measure conducted emissions (less than 30 MHz, CISPR 22) and radiated disturbance power (CISPR 14) also in order to fully characterize an EUT with connected cables.

A.5.2 EUT arrangement

Additional specific features and descriptions of EUT arrangements are deferred until the next edition of this standard. The following information is given for guidance purposes.

The EUT is placed in the centre of the usable test volume (5.1.2) on a manipulator (3.1.21 and Figures A.1, A.2b and c) or on a test set-up support (3.1.16).

Small EUTs without any cables shall be fixed in the rotation centre of the manipulator. Using the manipulator, the EUT is rotated around its electrical centre (which can be assumed to be identical with the geometrical centre of the EUT).

For EUTs with cable(s) the following cable routing applies. Long cables shall be bundled according to the rules stated in 7.2.5.2 of CISPR 16-2-3. The interconnecting cable(s) shall be routed perpendicularly from each case. In order to obtain repeatable measurement results, the relative positions of the interconnecting cable(s) and of the EUT shall not change throughout the three-position correlation algorithm. If the cable(s) are too long, the interconnecting cable(s) can be bundled according to 7.2.5.2 of CISPR 16-2-3.

Le ou les câbles de sortie doivent être posés perpendiculairement à chaque boîtier de l'appareil en essai à la limite du volume d'essai utilisable. Le câble est ensuite posé le long de la limite du volume d'essai utilisable jusqu'au coin à l'ortho-angle, et au bord inférieur du volume d'essai (Figure A.1). En utilisant un positionneur comme représenté à la Figure A.2b, le ou les câbles de sortie doivent être posés le long de l'ortho-axe. La position des câbles doit être maintenue, par exemple, par des pinces non-conductrices. Le ou les câbles de sortie sont posés du coin inférieur du volume d'essai utilisable à l'ortho-angle, à la ou aux pinces absorbantes au niveau du plan de sol du guide d'onde. Il convient que les câbles multiples soient séparés d'approximativement 100 mm. Au niveau du plan de sol du guide d'onde, chaque câble doit être terminé par des pinces absorbantes séparées comme définies dans la CISPR 16, ou par des ferrites à pince (voir [1]). Il convient que la perte d'insertion de la pince (ou de la ferrite à pince) soit supérieure à 15 dB pour la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 1 000 MHz. Le câble de connexion ne doit pas toucher le conducteur intérieur ou extérieur du guide d'onde TEM, avant que le câble ne soit terminé par la pince absorbante ou la ferrite à pince. Il doit y avoir jusqu'à 1,3 m de câble avant la position de la pince. Si le câble est d'une longueur inférieure à 1,3 m, alors tout le câble se trouve avant la position de la pince. Si le câble a une longueur supérieure à 1,3 m, au moins 1,3 m doit être avant la position de la pince (Figure A.1). Les câbles de sortie sont posés depuis les pinces absorbantes jusqu'aux connecteurs sur le plancher ou sur la paroi, et ensuite connectés au matériel associé à l'extérieur du guide d'onde TEM.

A.6 Rapport d'essai

A.6.1 Appareils en essai de petite taille dans les guides d'onde TEM

Pour les appareils en essai de petite taille et les appareils en essai de grande taille sans câbles, le rapport doit inclure à la fois les résultats de champs corrigés (E) et non corrigés (E_{max}), et déterminés comme suit

$$E = E_{max} - c_f, \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (\text{A. 19a})$$

avec E_{max} en V/m de l'Equation (A.5) et c_f en V/m de l'Equation (A.10), ou

$$E|_{dB} = E_{max}|_{dB} - 20 \cdot \lg(c_f) - 120, \quad \text{en dB } \frac{\mu V}{m} \quad (\text{A. 19b})$$

avec $E_{max}|_{dB}$ en dBμV/m de l'Equation (A.8) et c_f en V/m de l'Equation (A.10).

A.6.2 Appareils en essai de grande taille dans les guides d'onde TEM

A l'étude.

NOTE Pour les essais de conformité des appareils en essai de grande taille dans les guides d'onde TEM, la procédure suivante a été proposée:

- trois essais indépendants sur un type particulier d'appareil en essai doivent être réalisés avec un OATS spécifique conforme et le guide d'onde TEM spécifique. La différence moyenne entre les résultats du guide d'onde TEM et de l'OATS est calculée à chaque fréquence en utilisant l'Equation (A.11) avec $n = m = 3$;
- il est nécessaire que la moyenne et l'écart type en fonction de la fréquence des différences calculées à l'étape 2 pour un minimum de 10 fréquences satisfasse aux critères selon lesquels la différence moyenne est supérieure à 0 dB et inférieure ou égale à 3 dB, et l'écart type des différences est inférieur ou égal à 4 dB;
- il ne faut pas ajouter la différence moyenne aux valeurs lues du guide d'onde TEM pour déterminer la conformité avec la limite de perturbation. Si les critères de l'étape 3 sont satisfaits, le type d'appareil en essai est considéré comme conforme à la limite appropriée.

Des détails supplémentaires sont donnés en [2].

The exit cable(s) shall be routed perpendicularly from each EUT case to the boundary of the usable test volume. The cable is then routed along the border of the usable test volume to the corner at the ortho-angle and the lower edge of the test volume (Figure A.1). Using a positioner as shown in Figure A.2b, the exit cable(s) shall be routed along the ortho-axis. The cable position shall be restrained, for example, by non-conductive clamps. The exit cable(s) are routed from the lower corner of the usable test volume at the ortho-angle to the absorbing clamp(s) at the waveguide ground plane. Multiple cables should be separated by approximately 100 mm. At the waveguide ground plane, each cable is to be terminated by separate absorbing clamps, as defined in CISPR 16, or by clip-on ferrites (see [1]). The insertion loss of the clamp (or clip-on ferrite) should be greater than 15 dB for the frequency range of 30 MHz to 1 000 MHz. The connection cable shall not touch the inner or outer conductor of the TEM waveguide before the cable is terminated by the absorbing clamp or clip-on ferrite. Up to 1,3 m of cable are to precede the clamp location. If the cable is shorter than 1,3 m, then all of the cable precedes the clamp location. If the cable is longer than 1,3 m then at least 1,3 m of cable shall precede the clamp location (Figure A.1). Exit cables are routed from the absorbing clamps to connectors on the floor or wall, then connected to associated equipment outside the TEM waveguide.

A.6 Test report

A.6.1 Small EUTs in TEM waveguides

For small EUTs, and large EUTs without cables, the report shall include both the corrected (E) and uncorrected (E_{max}) field strength results, as determined according to

$$E = E_{max} - c_f, \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.19a})$$

with E_{max} in V/m from Equation (A.5) and c_f in V/m from Equation (A.10), or

$$E|_{\text{dB}} = E_{max}|_{\text{dB}} - 20 \cdot \lg(c_f) - 120, \quad \text{in dB } \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{A.19b})$$

with $E_{max}|_{\text{dB}}$ in dB $\mu\text{V}/\text{m}$ from Equation (A.8) and c_f in V/m from Equation (A.10).

A.6.2 Large EUTs in TEM waveguides

Under consideration.

NOTE For compliance testing of large EUTs in TEM waveguides, the following procedure has been proposed:

- three independent tests on a particular EUT type must be completed at a specific compliant OATS and the specific TEM waveguide. The average difference between TEM waveguide and OATS results is calculated at each frequency using Equation (A.11) with $n = m = 3$;
- the average and standard deviation versus frequency of the differences calculated in step 2 for a minimum of 10 frequencies must fulfil the criteria that the average difference is greater than 0 dB and less than, or equal to, 3 dB, and the standard deviation of the differences is less than, or equal to, 4 dB;
- no addition of the average difference to the TEM waveguide readings must be made when determining compliance with the disturbance limit. If the criteria of step 3 are satisfied, the EUT type is considered to be compliant with the appropriate limit.

Further details are given in [2].

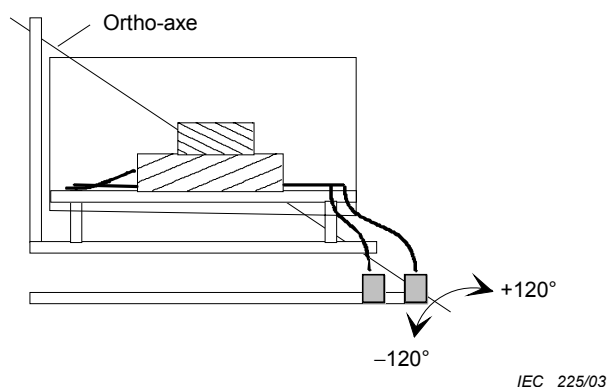


Figure A.1a – Vue de côté

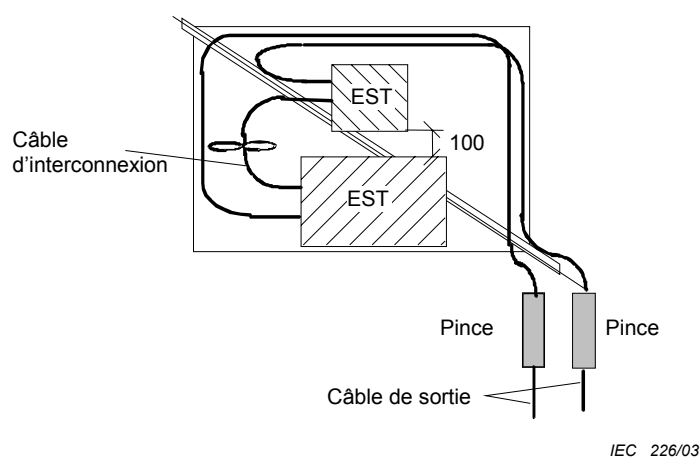


Figure A.1b – Vue de dessus

NOTE Les grands EST sont à l'étude, par conséquent la disposition du câblage également.

La longueur du câble de raccordement entre le boîtier de l'EST et la charge doit être d'environ 1,3 m.

Figure A.1 – Disposition du câble de sortie au coin à l'ortho-angle et au bord inférieur du volume d'essai

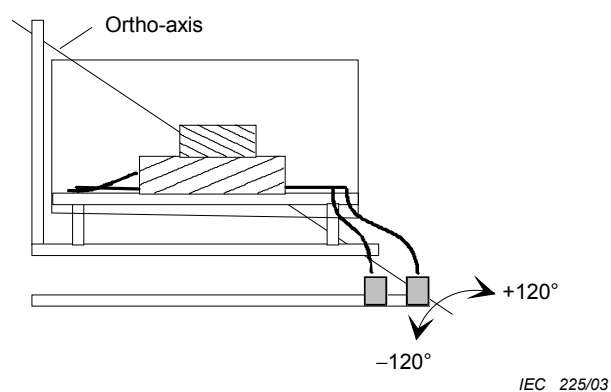


Figure A.1a – Side view

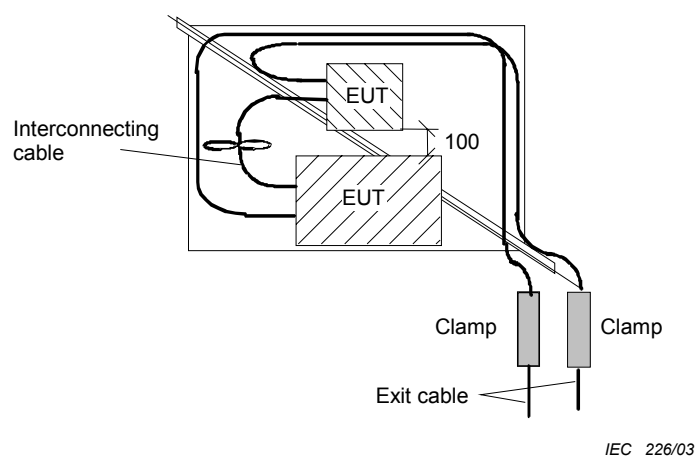
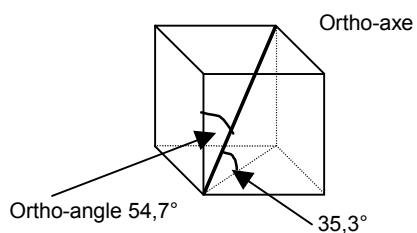


Figure A.1b – Top view

NOTE Large EUTs are under consideration and therefore also cable routing.

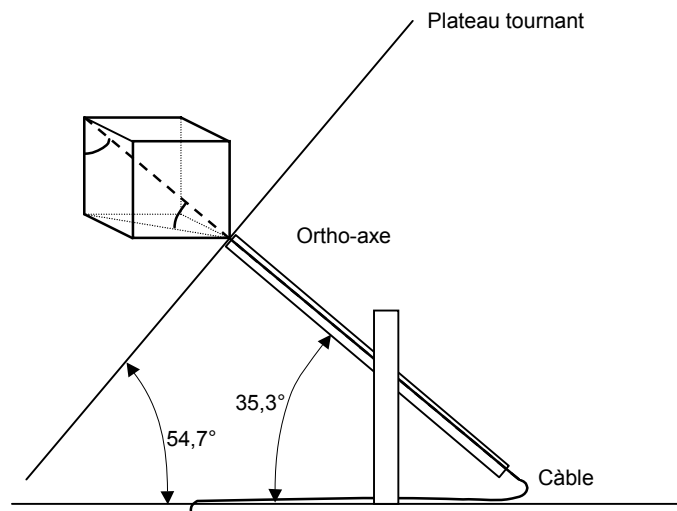
The length of the connection cable between the EUT case and the termination shall be approximately 1,3 m.

Figure A.1 – Routing the exit cable to the corner at the ortho-angle and the lower edge of the test volume



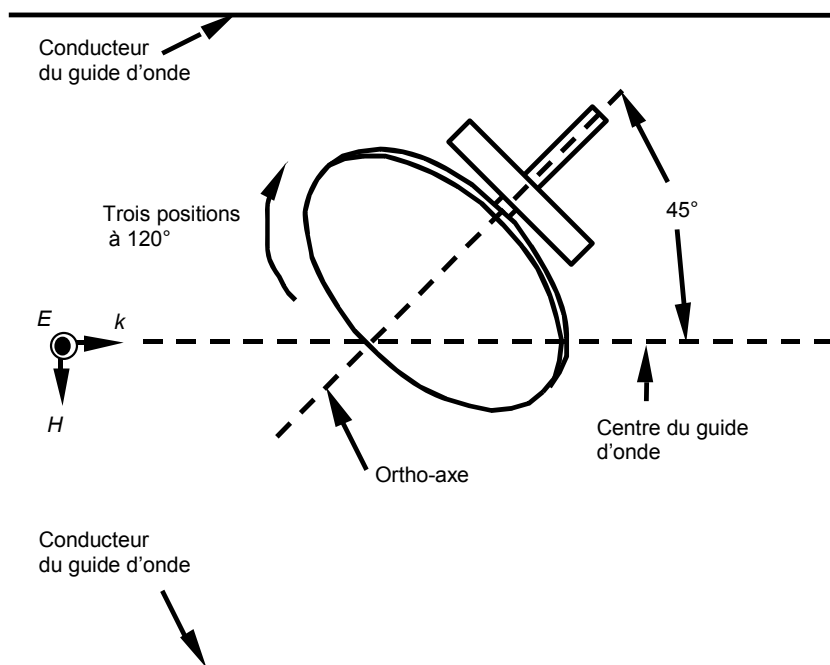
IEC 227/03

Figure A.2a – Ortho-axe et ortho-angle



IEC 228/03

Figure A.2b – Vue de côté (3.1.21 et A.5.2)

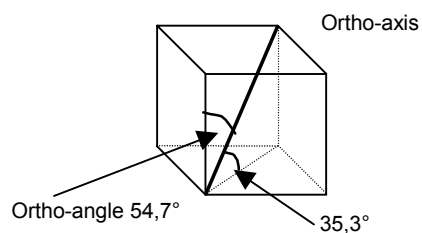


IEC 229/03

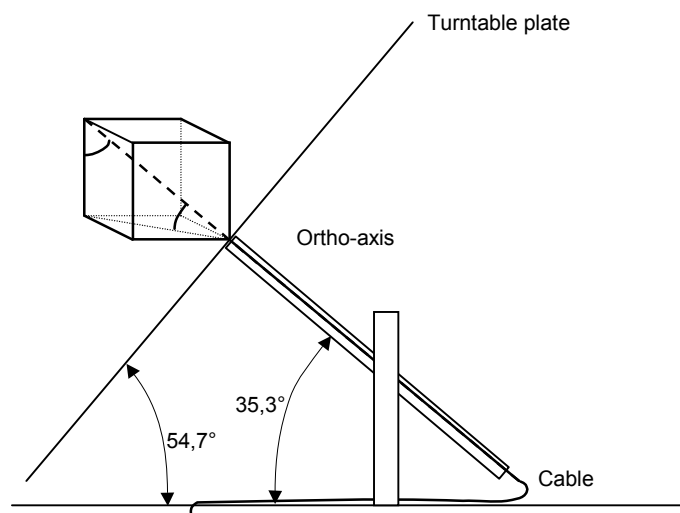
Figure A.2c – Vue de dessus (3.1.21 et A.5.2)

De manière analogue au dispositif de la Figure A.1, ce positionneur donne trois positions orthogonales au moyen de trois rotations de 120° autour de l'ortho-axe.

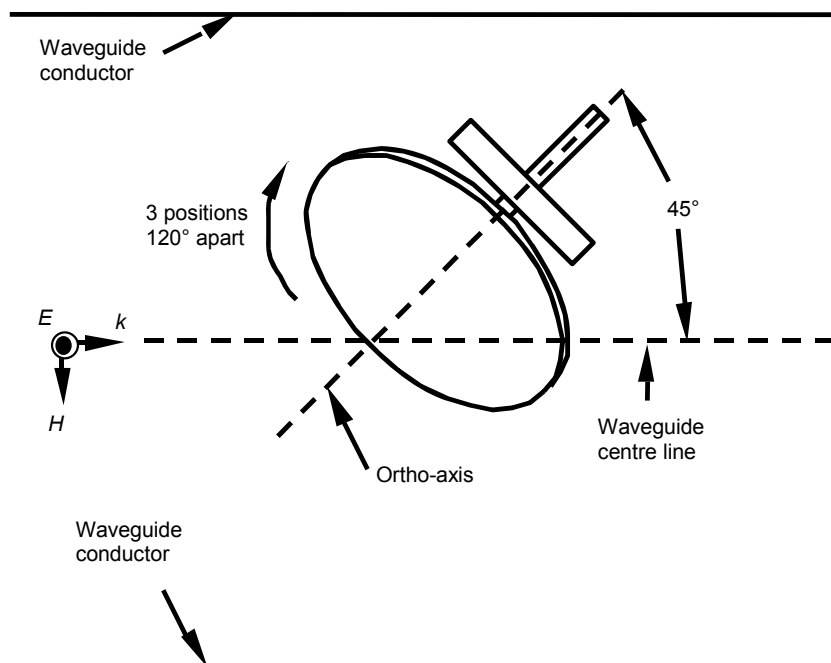
Figure A.2 – Positionneur d'ortho-axe ou manipulateur de base



IEC 227/03

Figure A.2a – The ortho-axis and the ortho-angle

IEC 228/03

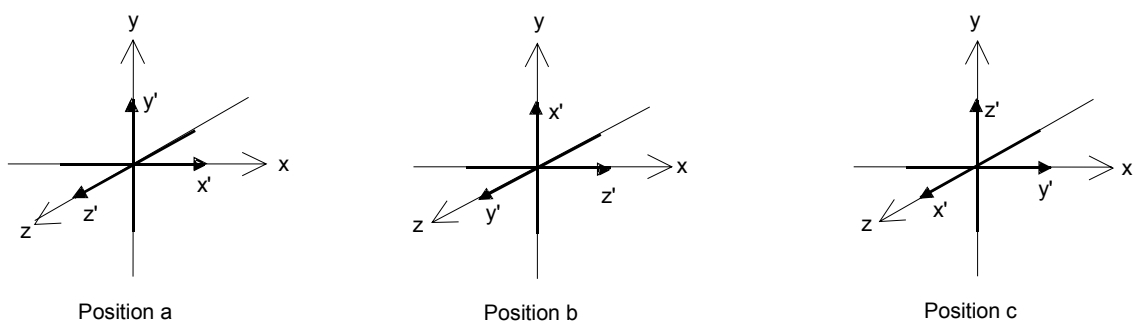
Figure A.2b – Side view (see 3.1.21 and A.5.2)

IEC 229/03

Figure A.2c – Top view (see 3.1.21 and A.5.2)

Analogous to the set-up of Figure A.1, this positioner gives 3 orthogonal positions by means of 3 120° rotations around the ortho-axis.

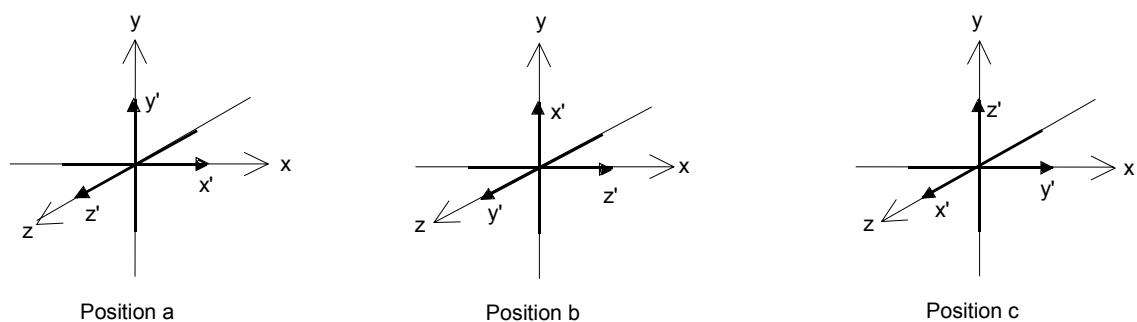
Figure A.2 – Basic ortho-axis positioner or manipulator



IEC 230/03

Les trois positions de rotation d'axe orthogonal correspondent aux positions a1, b1, c1 de la Figure A.4. Les axes de coordonnées en guide d'onde TEM x , y , z n'ont pas d'axes primes, alors que les axes de coordonnées x' , y' , z' de l'appareil en essai ont une notation prime.

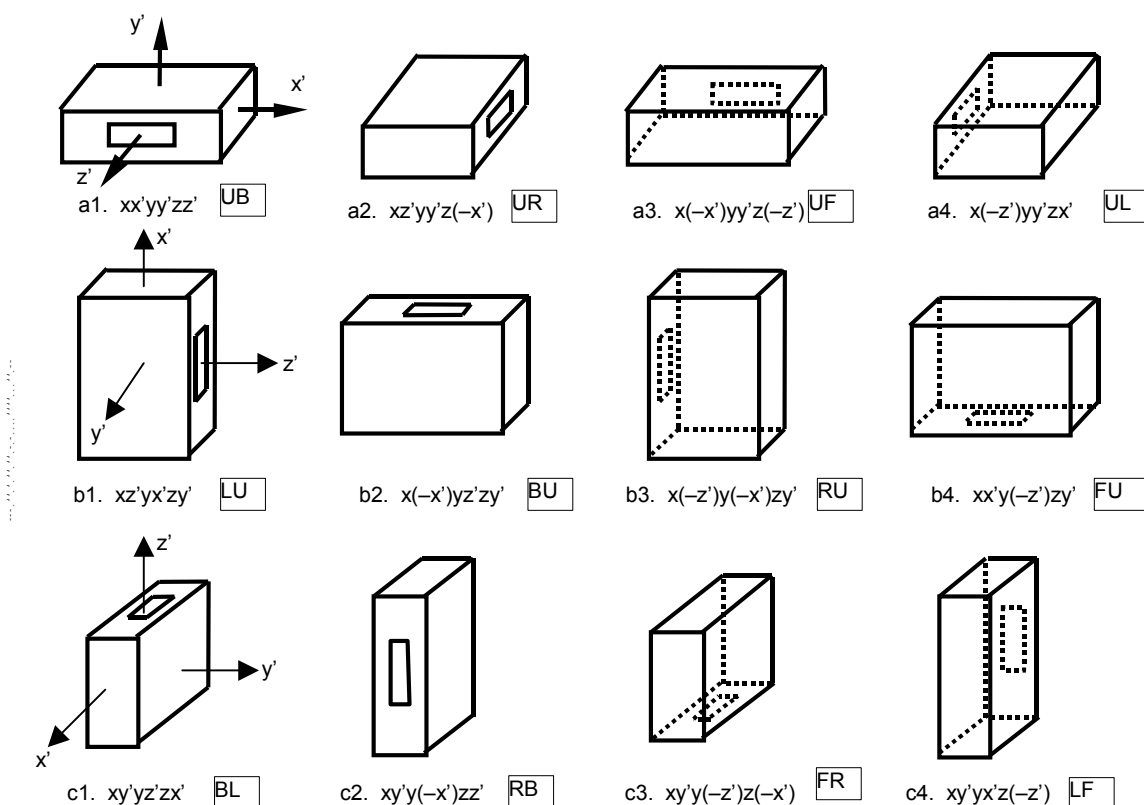
Figure A.3 – Trois positions de rotation d'axe orthogonal pour les mesures d'émission



IEC 230/03

The three orthogonal axis rotation positions correspond to positions a1, b1, c1 in Figure A.4. TEM waveguide coordinate axes x , y , z are unprimed, while the EUT coordinate axes x' , y' , z' have primed notation.

Figure A.3 – Three orthogonal axis-rotation positions for emission measurements



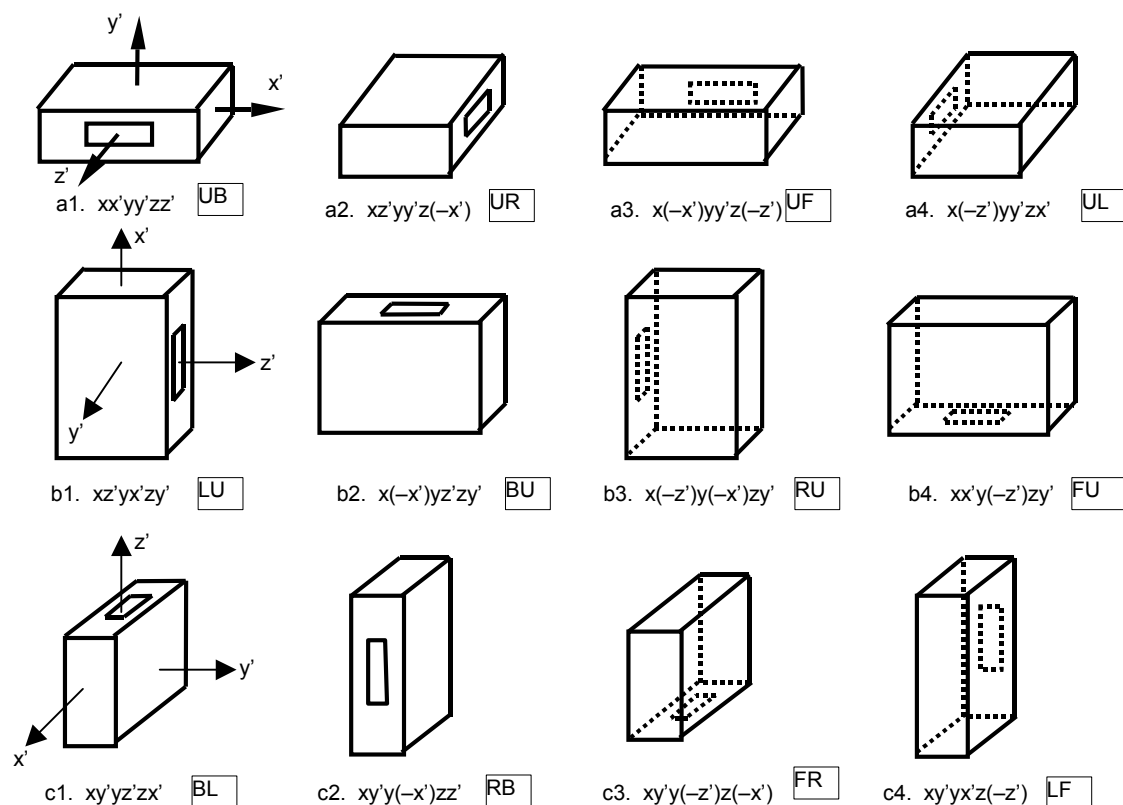
IEC 231/03

NOTE Dans cet exemple, x, y, z sont les axes de coordonnées du guide d'onde TEM, x', y', z' sont les axes de coordonnées de l'appareil en essai et le champ est polarisé le long de l'axe y et se propage le long de l'axe z . Il est nécessaire que le centre virtuel (ou géométrique ou de phase) de l'appareil en essai reste dans la même position par rapport aux conducteurs du guide d'onde TEM.

Les côtés de l'appareil en essai sont définis par la position a1 ($x' = x, y' = y, z' = z$): gauche (L) = droite (R) $\equiv y'z' = \text{plan } yz$, arrière (B) = face (F) $\equiv x'y' = xy$, dessus (T) = dessous (U) $\equiv x'z' = xz$. La direction de propagation est alignée avec l'axe z . C'est pourquoi le front d'onde en a1 est le côté arrière. Chaque position de l'appareil en essai peut être décrite par deux lettres: la première lettre désigne le côté de l'appareil en essai qui fait face au sol du guide d'onde TEM, la seconde lettre désigne le côté qui fait face au front d'onde (vers la direction de propagation).

Chaque colonne de cette figure/matrice (par exemple a3, b3, c3) montre un jeu de trois positions orthogonales qui peuvent être utilisées pour l'algorithme de corrélation à trois positions. De même, dans un essai d'immunité, les huit faces minimales sont données, par exemple, par les deux jeux de quatre positions a1, a2, a3, a4, et b1, b2, b3, b4. Lorsque l'ensemble des 12 positions est nécessaire dans un essai d'immunité, ajouter les positions c1, b2, c3, b4, où c3 et b4 subiraient normalement une rotation de 180° autour de l'axe z . Dans ce cas c3, $xy'y(-z')z(-x')$ devient $x(-y')yz'z(-x')$, et b4 $xx'y(-z')zy'$ devient $x(-x')yz'zy'$.

Figure A.4 – Orientations canoniques à 12 faces/axes pour un appareil en essai typique



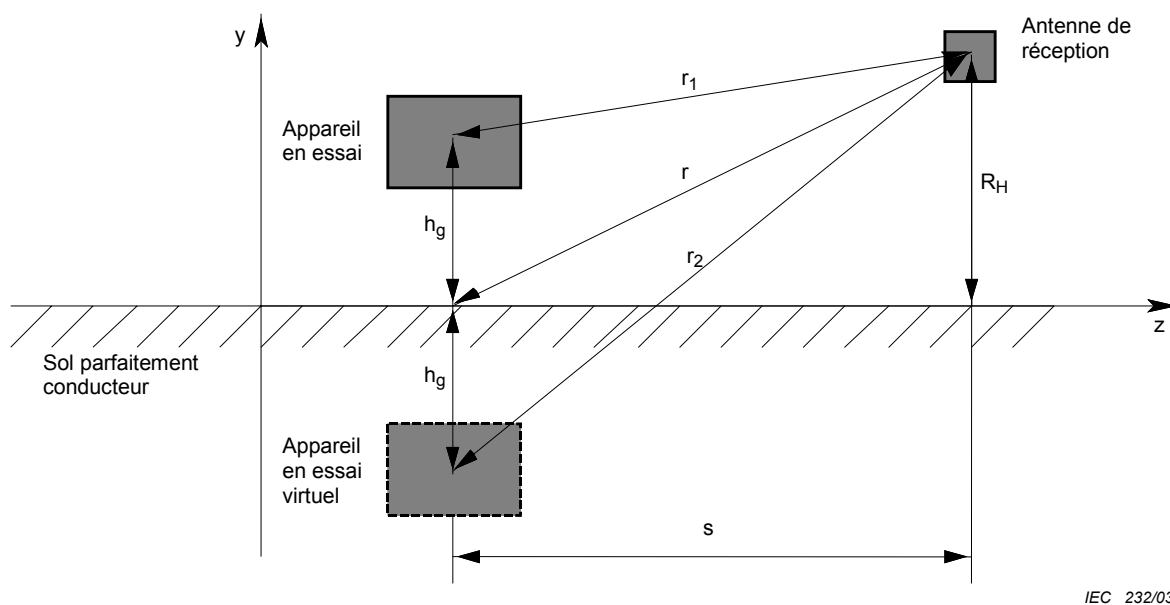
IEC 231/03

NOTE In this example, x, y, z are the TEM waveguide coordinate axes, x', y', z' are the EUT coordinate axes, and the field is polarized along the y -axis and propagating along the z -axis. The virtual (or geometric or phase) centre of the EUT must remain at the same position relative to TEM waveguide conductors.

The sides of the EUT are defined by position a1) ($x' = x, y' = y, z' = z$): Left (L) = Right (R) $\equiv y'z' = yz$ plane, Back (B) = Front (F) $\equiv x'y' = xy$, Top (T) = Underside (U) $\equiv x'z' = xz$. The propagation direction is aligned with the z -axis. Therefore, the wave front in a1 is the back side. Each position of the EUT can be described by two letters: the first letter designates the side of the EUT facing the TEM waveguide floor, the second letter designates the side facing the wave front (towards the propagation direction).

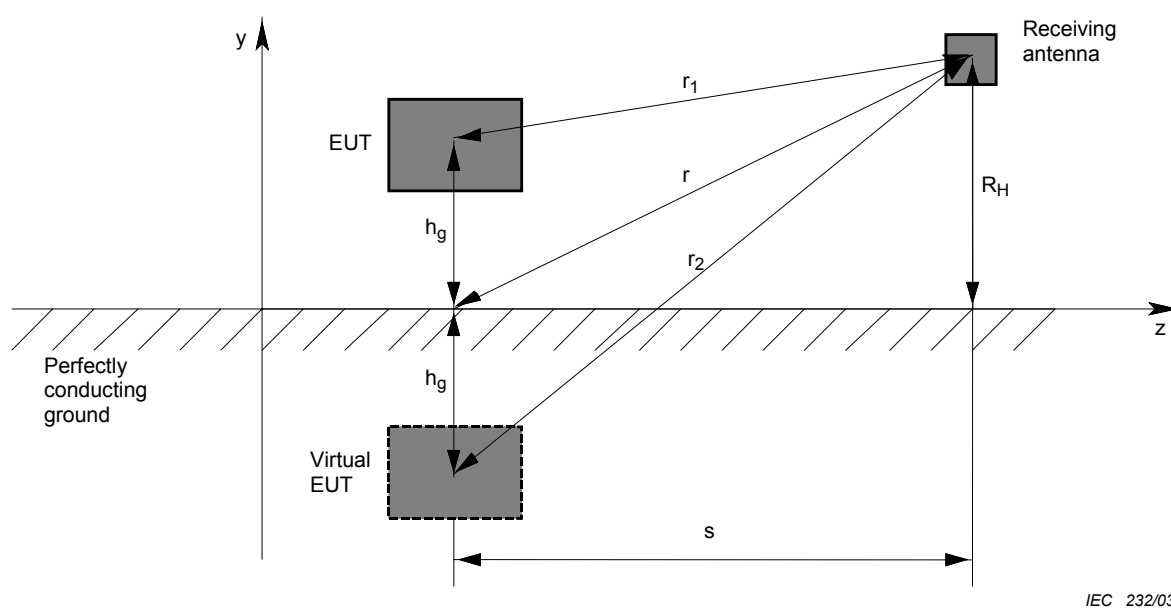
Each column of this figure/matrix (for example, a3, b3, c3) shows a set of three orthogonal positions that can be used for the three-position correlation algorithm. Similarly, in an immunity test, the minimum eight faces are given by, for example, the two sets of four positions a1, a2, a3, a4, and b1, c2, b3, c4. When all 12 positions are needed in an immunity test, add positions c1, b2, c3, b4, where c3 and b4 would typically be rotated by 180° around the z -axis. In this case c3. $xy'y(-z')z(-x')$ becomes $x(-y')yz'z(-x')$, and b4. $xx'y(-z')zy'$ becomes $x(-x')yz'zy'$.

Figure A.4 – Canonical 12-face/axis orientations for a typical EUT



NOTE L'axe z est horizontal comme le plan de sol et il est aligné avec la direction de propagation. Ceci est cohérent avec le système de coordonnées des guides d'onde TEM, où l'axe z est parallèle au conducteur et aligné avec la direction de propagation.

Figure A.5 – Géométrie de l'emplacement d'essai en espace libre



NOTE The z -axis is horizontal like the ground plane and aligned with the propagation direction. This is consistent with the coordinate system of TEM waveguides, where the z -axis is parallel to the conductor and aligned with the propagation direction.

Figure A.5 – Open-area test site geometry

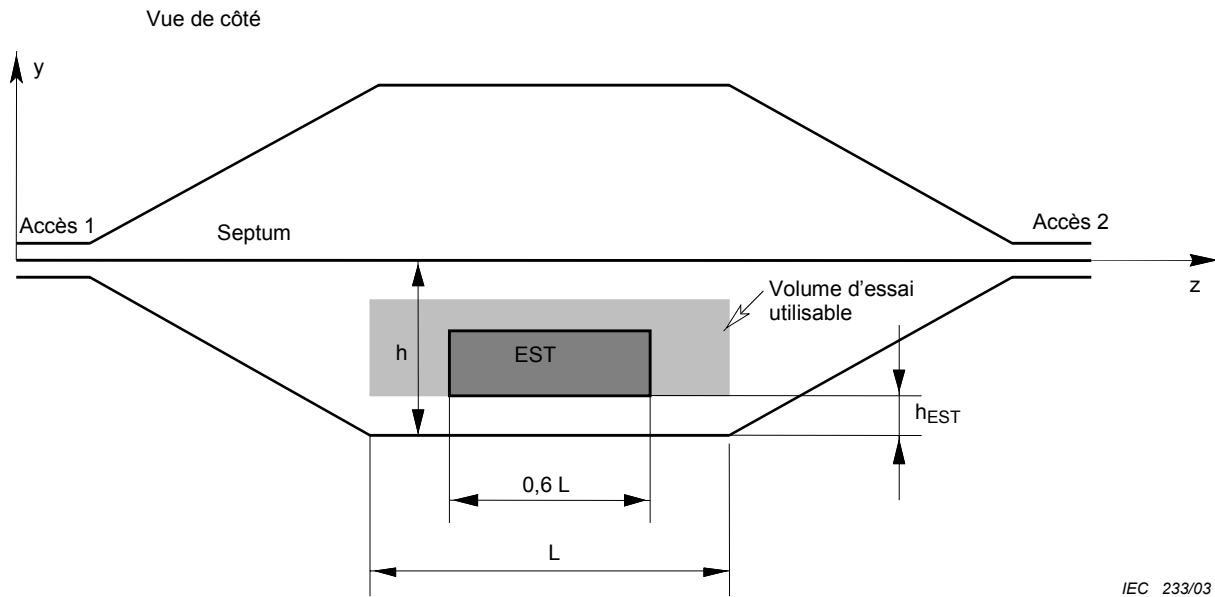


Figure A.6a – Vue de côté

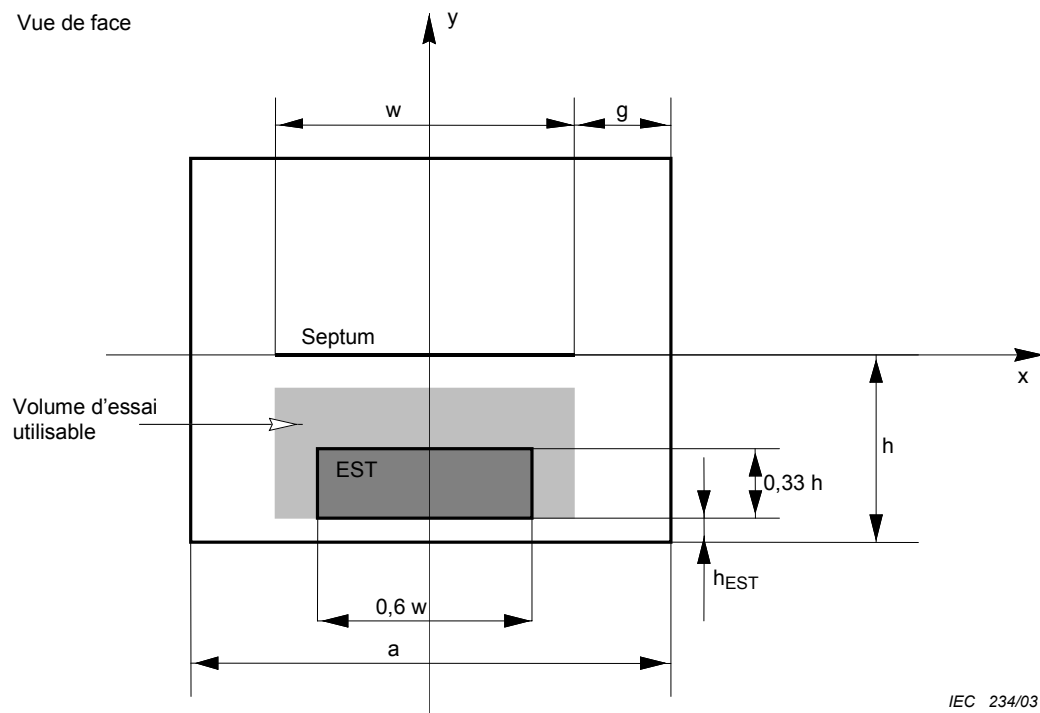


Figure A.6b – Vue en coupe

Figure A.6 – Cellule TEM à deux accès (septum symétrique)

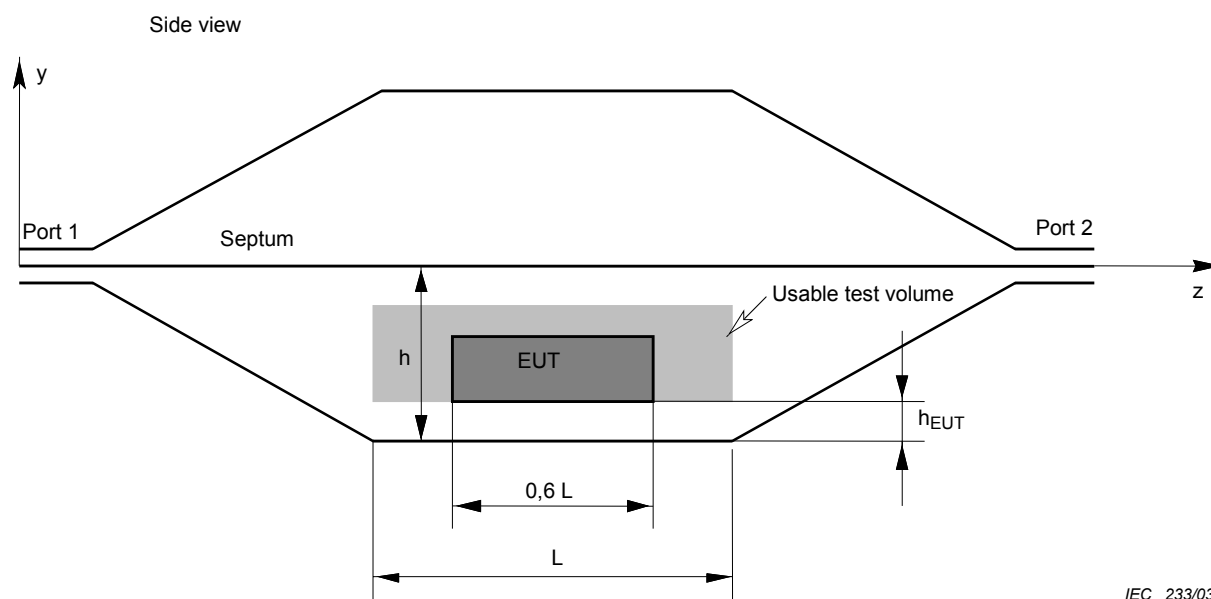


Figure A.6a – Side view

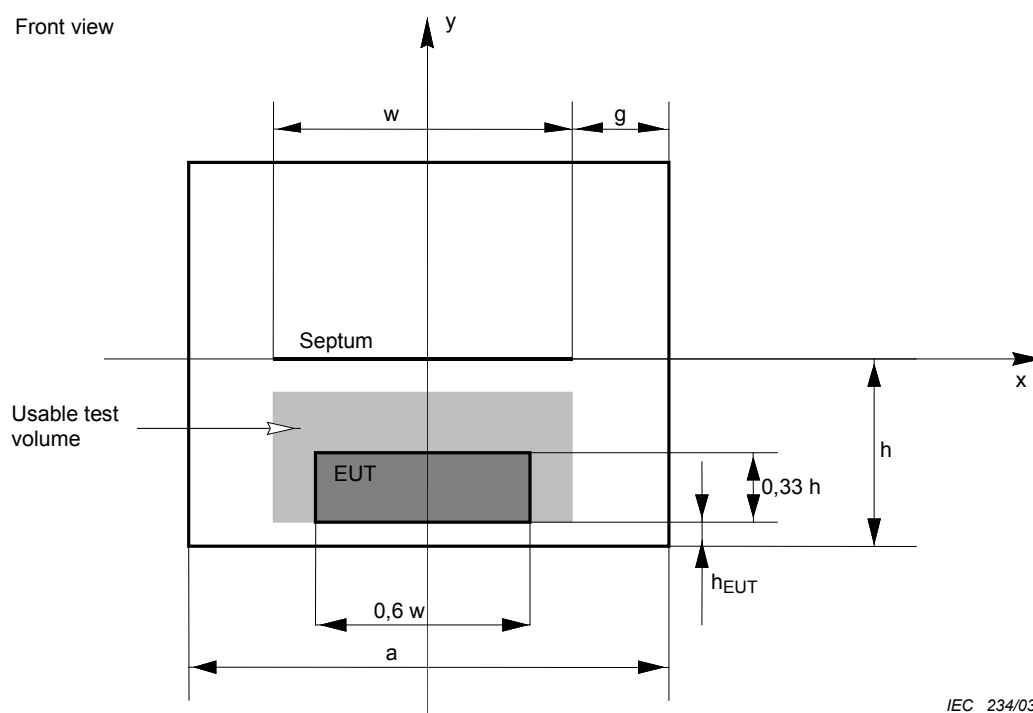


Figure A.6b – Cross-section

Figure A.6 – Two-port TEM cell (symmetric septum)

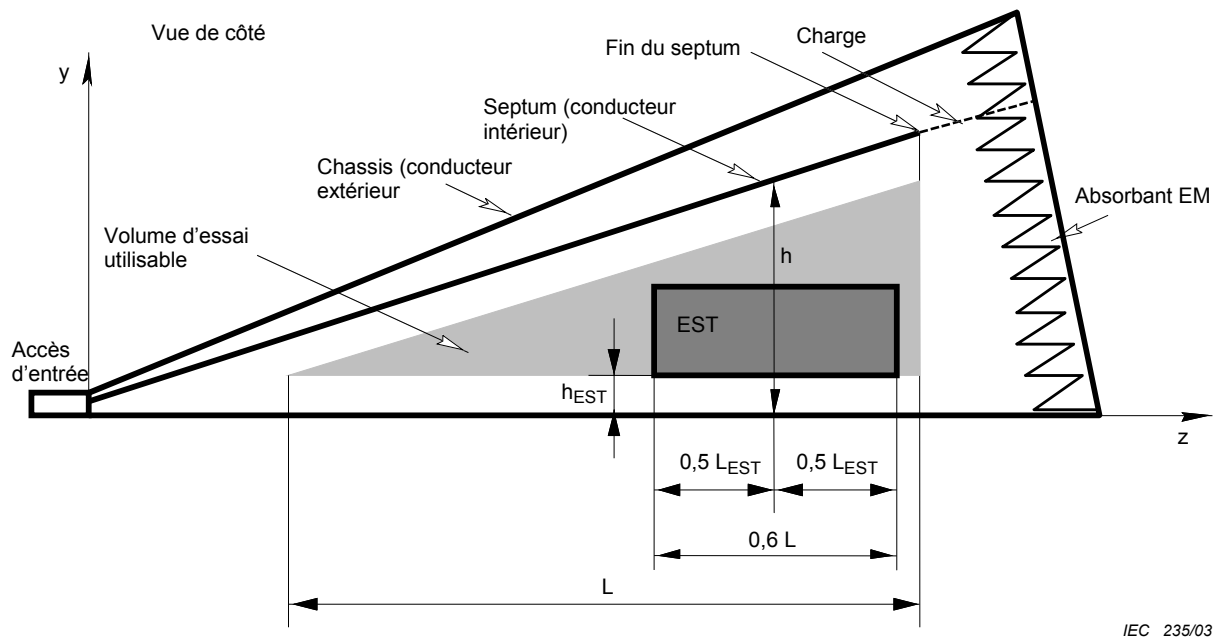


Figure A.7a – Vue de côté

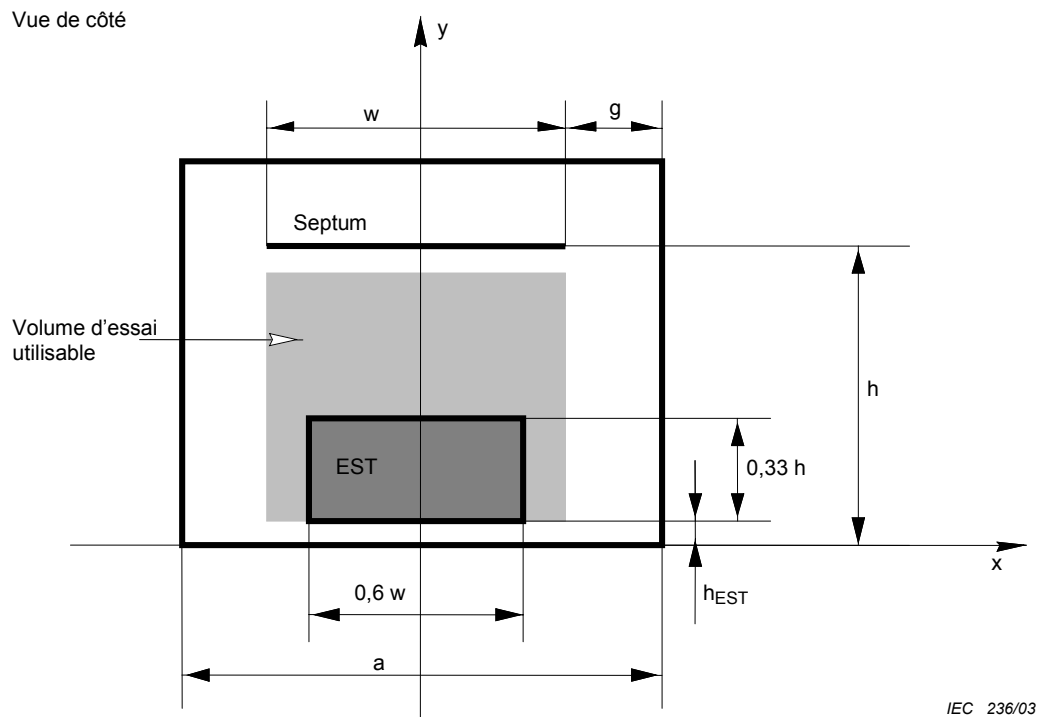


Figure A.7b – Vue en coupe

Figure A.7 – Cellule TEM à un accès (septum asymétrique)

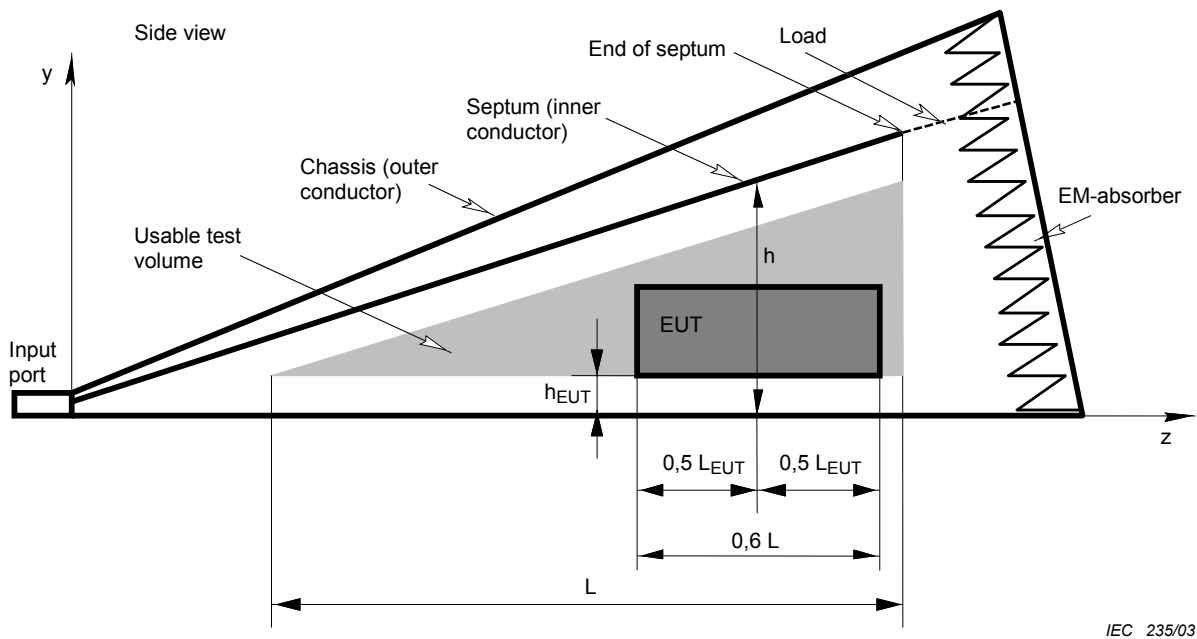


Figure A.7a – Side view

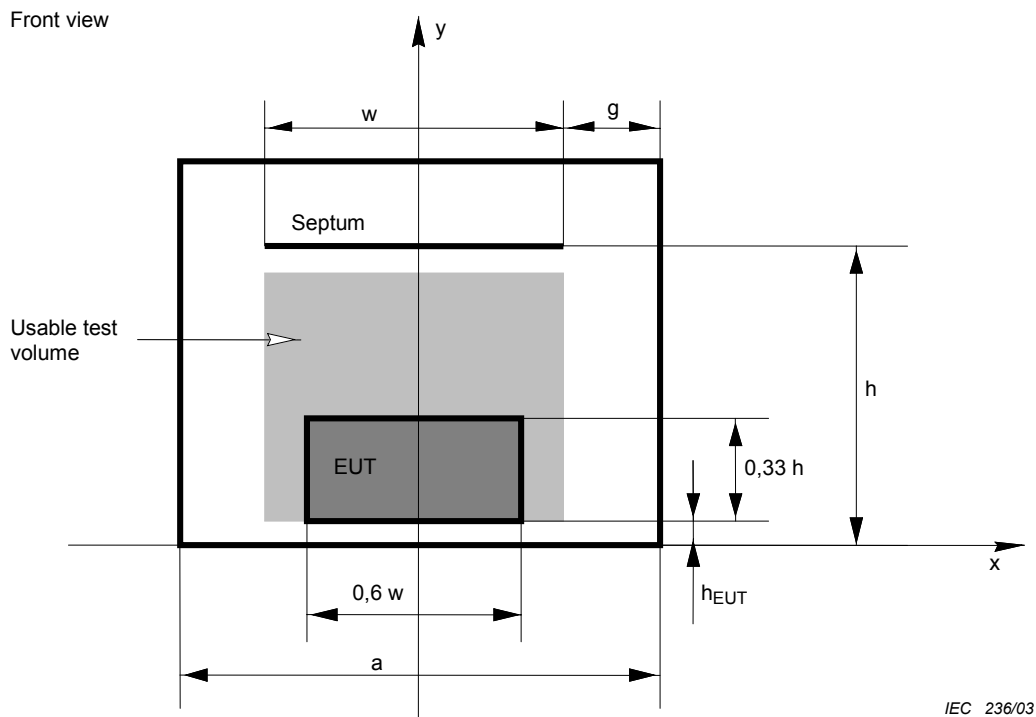


Figure A.7b – Cross-section

Figure A.7 – One-port TEM cell (asymmetric septum)

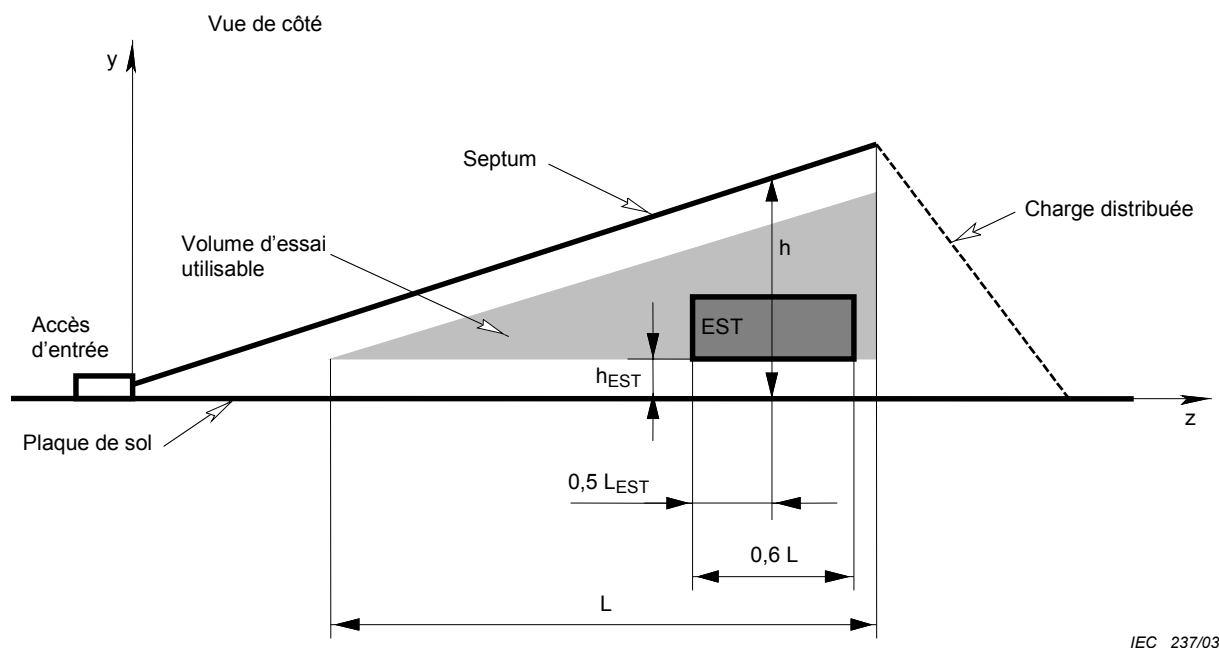


Figure A.8a – Vue de côté (1)

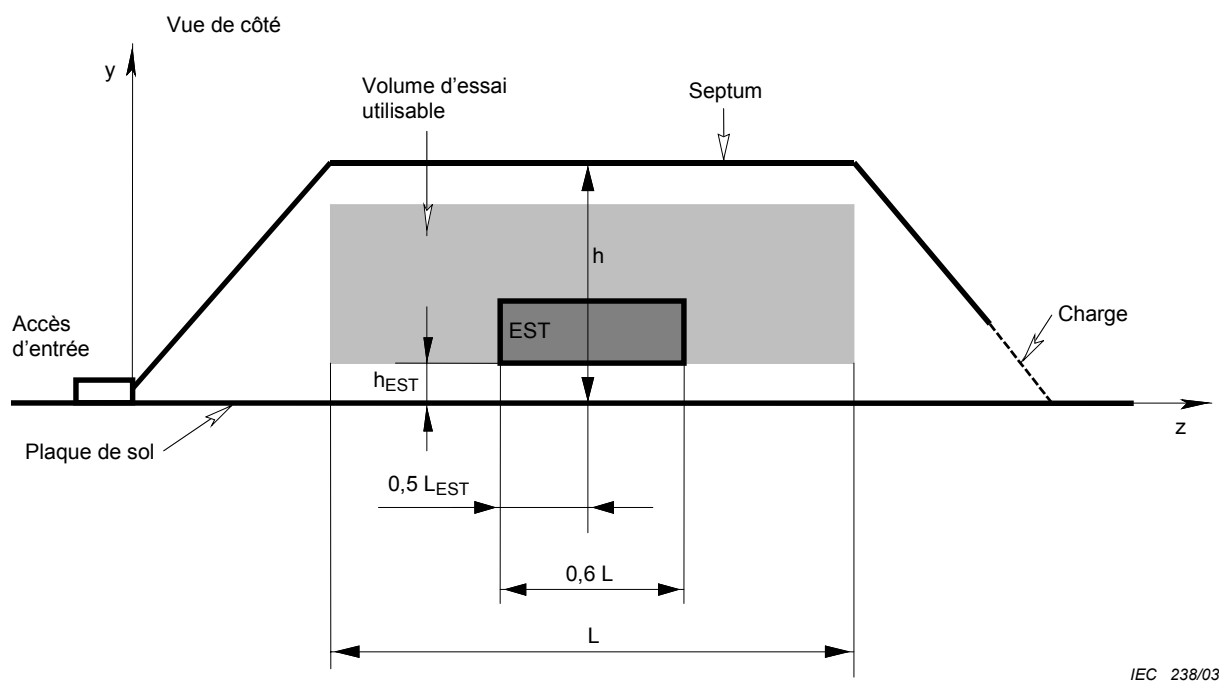


Figure A.8b – Vue de côté (2)

NOTE Une ligne ouverte tri-plaques avec vue latérale d'axe comme à la Figure A.6a est obtenue en utilisant cette géométrie et la théorie d'image.

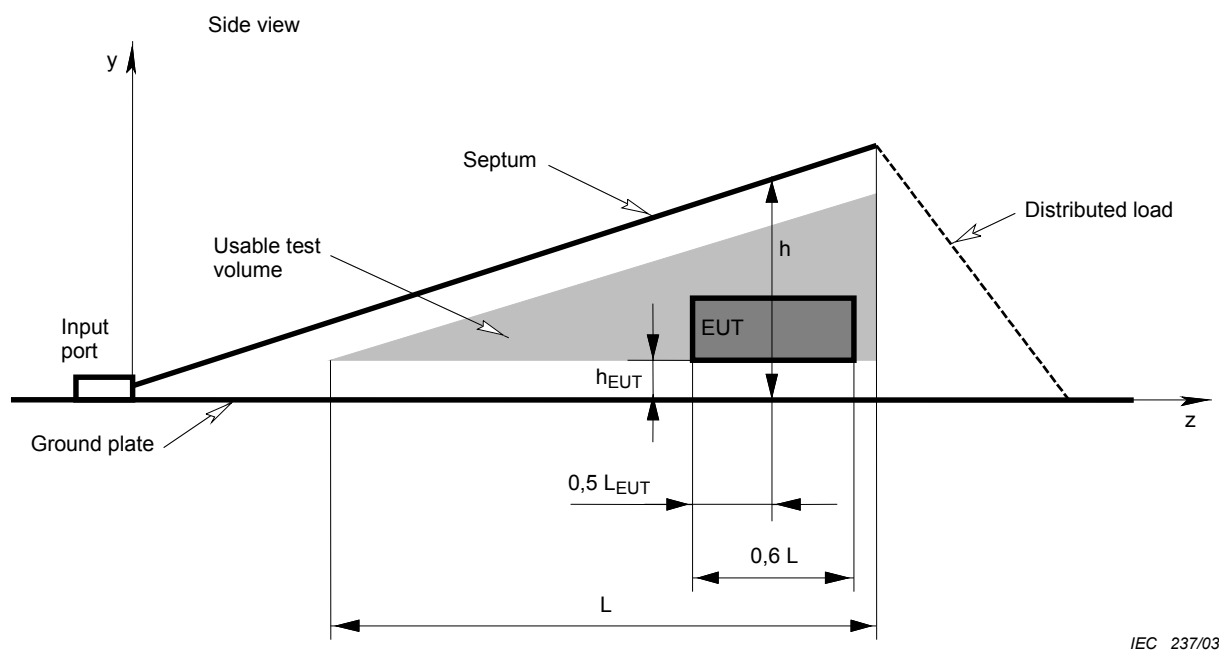


Figure A.8a – Side view (1)

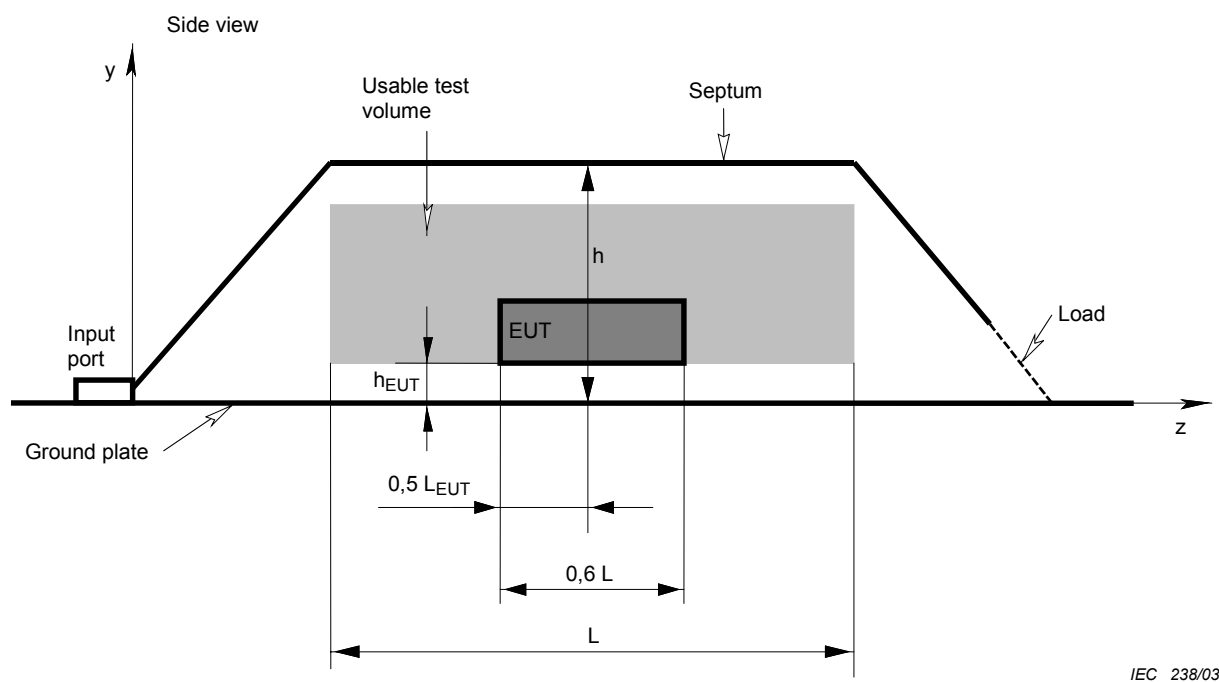


Figure A.8b – Side view (2)

NOTE A tri-plate stripline with centre-line side view the same as that of Figure A.6a is obtained using this geometry and image theory.

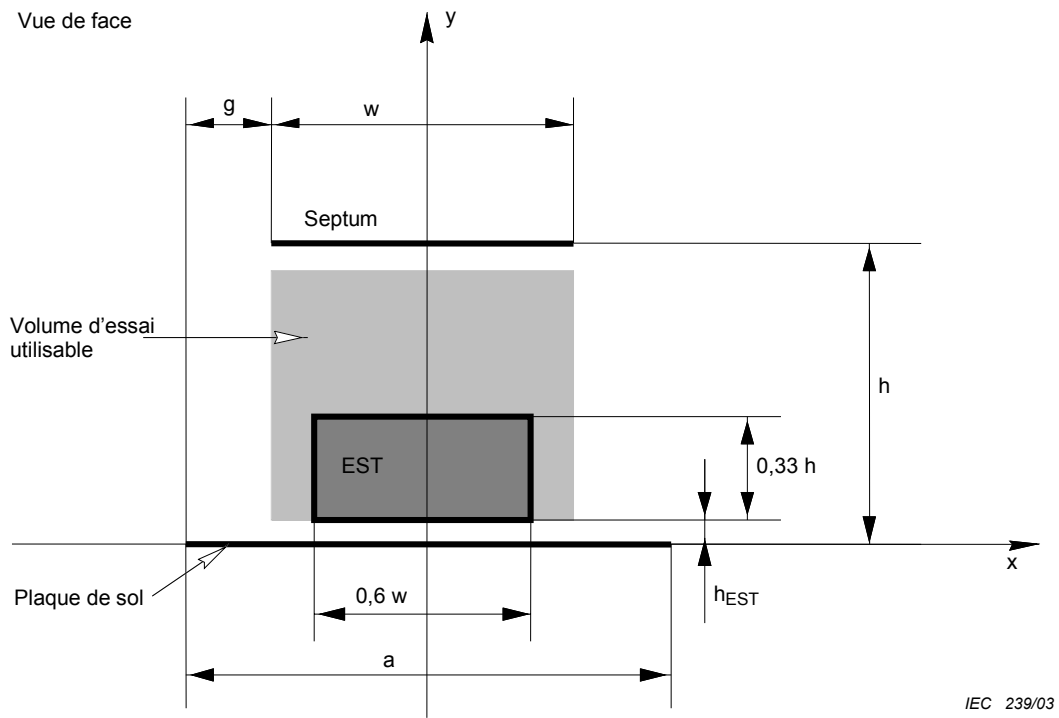


Figure A.8c – Vue en coupe

Figure A.8 – Ligne ouverte (deux plaques)

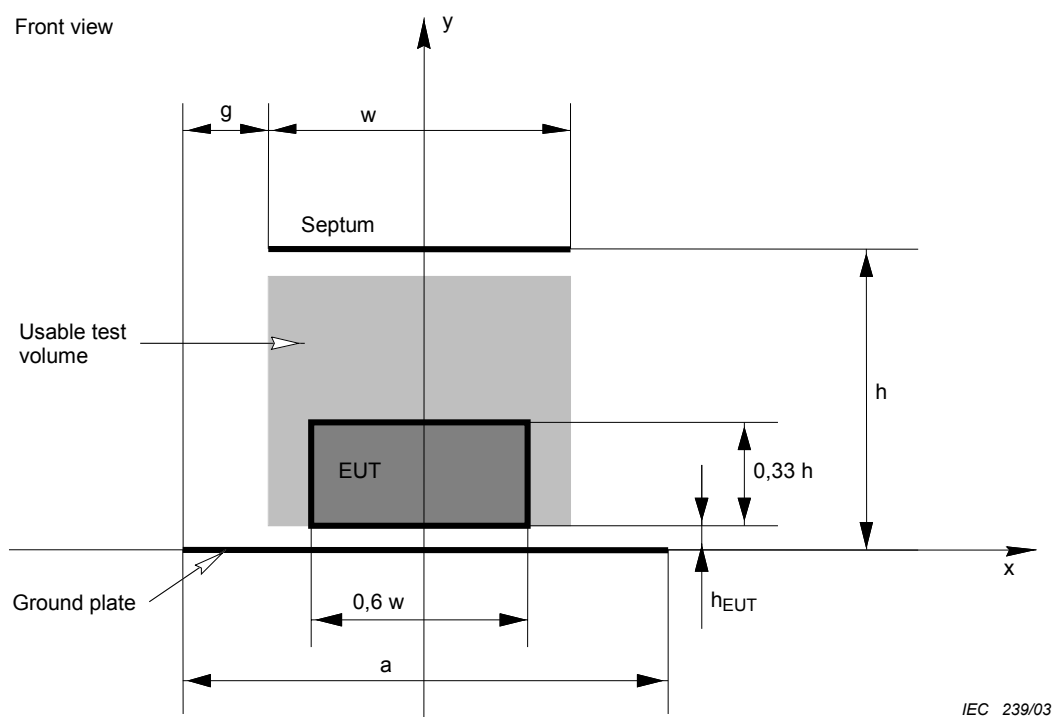
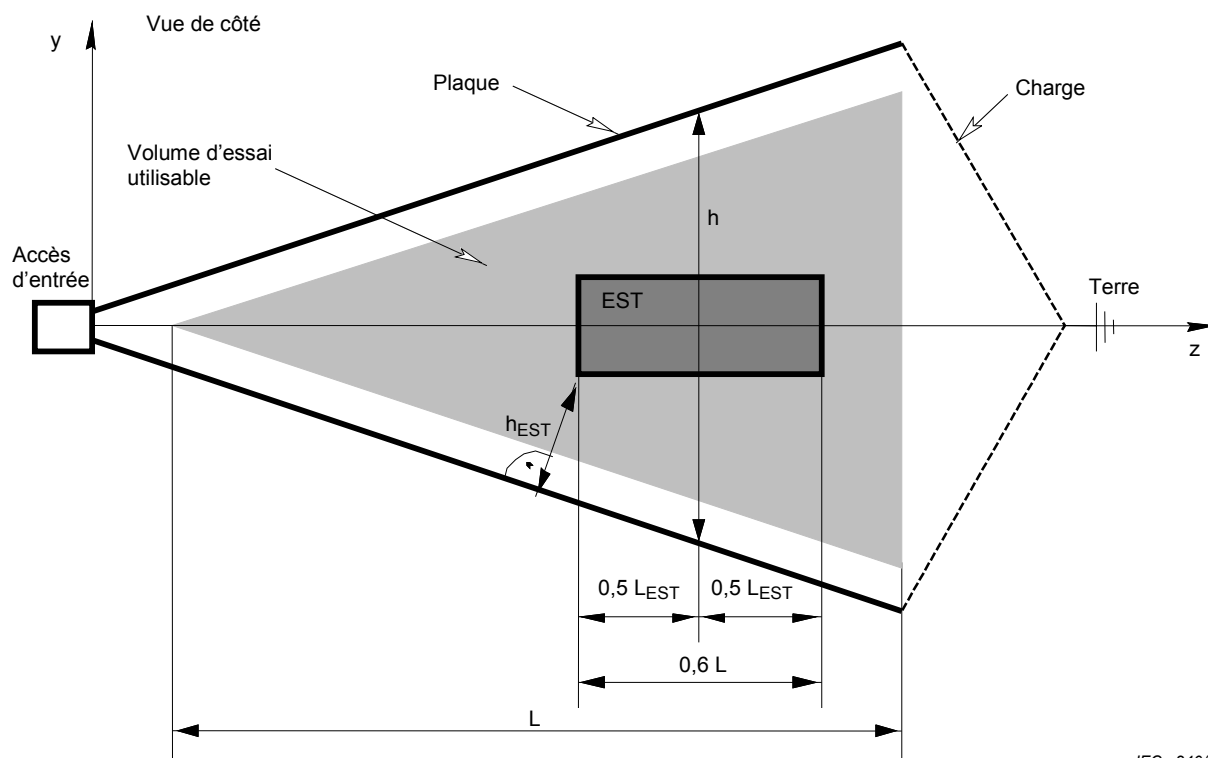


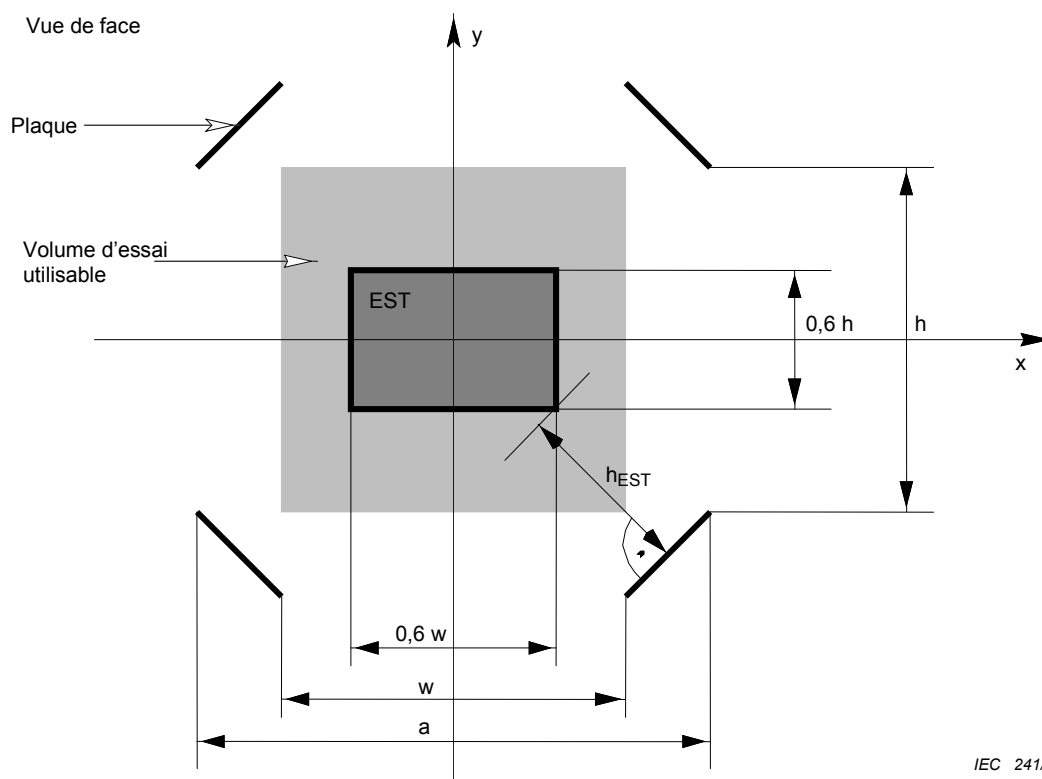
Figure A.8c – Cross-section

Figure A.8 – Stripline (two plates)



IEC 240/03

Figure A.9a – Vue de côté

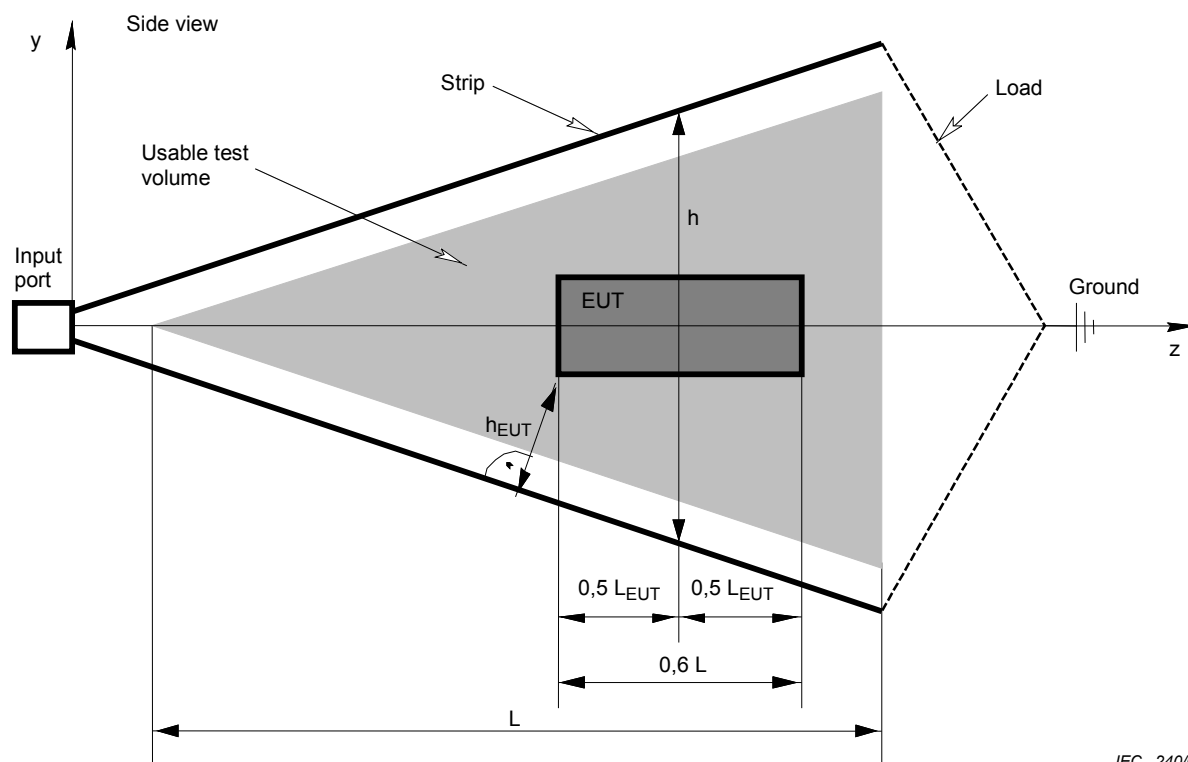


IEC 241/03

Figure A.9b – Vue en coupe

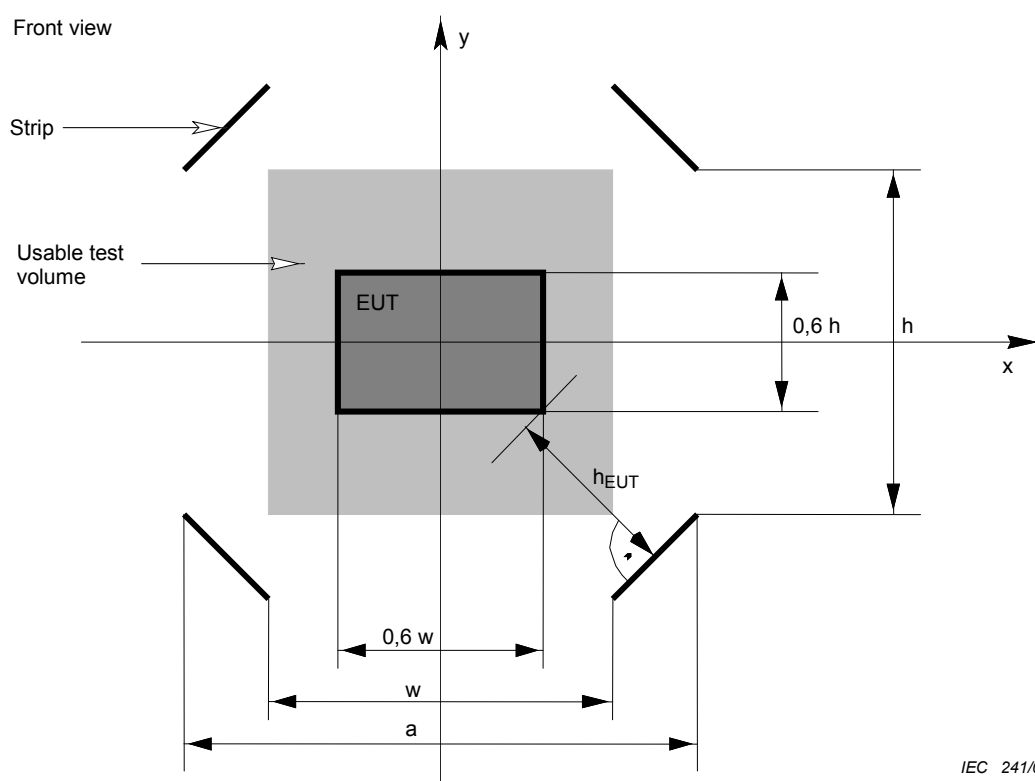
NOTE L'ensemble de la configuration est entouré par une enveloppe complètement anéchoïque. Pour des raisons symétriques, la restriction de hauteur maximale utilisable d'appareil en essai varie entre $0,33 h$ et $0,6 h$ (voir 5.1.2).

Figure A.9 – Ligne ouverte (quatre plaques, alimentation équilibrée)



IEC 240/03

Figure A.9a – Side view



IEC 241/03

Figure A.9b – Cross-section

NOTE The whole configuration is surrounded by a fully anechoic enclosure. For symmetrical reasons the restriction of the maximum usable EUT height changes from $0,33 h$ to $0,6 h$ (see 5.1.2).

Figure A.9 – Stripline (four plates, balanced feeding)

Annexe B (normative)

Essais d'immunité dans les guides d'onde TEM

B.1 Introduction

Cette annexe décrit les essais d'immunité en guides d'onde TEM. L'intention est de permettre les essais d'immunité des matériels électriques et électroniques à un champ électromagnétique incident.

L'essai est réalisé avec une mise en œuvre spécifique de l'EST. Ceci nécessite que l'installation d'essai et les limites ou niveaux d'essai soient définis par des normes de produits ou de familles de produits spécifiques.

B.2 Matériels d'essai

Les types de matériels d'essai suivants sont recommandés:

- guide d'onde TEM: d'une taille appropriée pour maintenir un champ uniforme de dimensions suffisantes pour contenir les appareils en essai prévus;
- filtres contre les perturbations électromagnétiques;
- générateur(s) de signal à fréquences radioélectriques;

NOTE 1 Il est souvent utile de contrôler la puissance transmise et réfléchie dans les guides d'onde TEM lors de l'établissement des niveaux de champ. Un coupleur directif accompagné d'un voltmètre ou wattmètre RF permet la mesure de la puissance réelle transmise vers le guide d'onde TEM (par opposition avec la puissance nominale du générateur de signal RF). Les deux doivent couvrir la largeur de bande prévue.

- amplificateurs de puissance;
- capteurs de champ, capables de surveiller séparément le champ électrique le long des trois axes orthogonaux. Tout circuit de tête de sonde et le système optoélectronique doivent avoir une immunité appropriée au champ à mesurer et une liaison à fibres optiques vers l'indicateur à l'extérieur du guide d'onde TEM. Une ligne de signal correctement filtrée peut être utilisée;

NOTE 2 Les guides d'onde TEM exigent une sonde de champ permettant la mesure du champ électrique de manière individuelle le long des trois axes orthogonaux. Si une petite antenne à un seul axe est utilisée, elle sera repositionnée pour mesurer chaque composante de champ séparément.

- matériels associés pour enregistrer les niveaux de puissance.

B.2.1 Description de l'installation d'essai

NOTE Une cellule TEM se comporte elle-même comme une enceinte blindée. Dans le cas d'une ligne ouverte, il convient que celle-ci soit située dans une enceinte blindée assez grande pour assurer l'isolation. Cette enceinte de blindage peut exiger une quantité appropriée de matériau absorbant pour que la ligne ouverte remplisse les exigences de zone uniforme.

Pour les guides d'onde TEM, le mode TEM est équivalent à une onde plane incidente permettant de réaliser des essais d'immunité. Alors qu'une onde plane idéale est invariante sur tout front d'onde à phase constante, dans une ligne de transmission les champs de mode TEM varieront sur un front à phase constante conformément aux caractéristiques de la géométrie de la section transversale. Les méthodes en chambre anéchoïque et en guide d'onde TEM sont fondées sur une distribution de champ d'onde plane avant insertion de l'appareil en essai. Un diagramme de champ en mode TEM est plus proche de la polarisation verticale dans une chambre anéchoïque, alors que dans une chambre le diagramme de champ en polarisation horizontale est plus sujet aux distorsions causées par les réflexions du plan de masse.

Annex B **(normative)**

Immunity testing in TEM waveguides

B.1 Introduction

This annex describes immunity testing in TEM waveguides. The intention is to enable the testing of electrical and electronic equipment for immunity to an incident electromagnetic field.

The test is performed with a specific arrangement of the EUT. This requires that the test set-up and the test limits or levels are defined by specific product or product family standards.

B.2 Test equipment

The following types of test equipment are recommended:

- TEM waveguide: of a size adequate to maintain a uniform field of sufficient dimensions to contain the intended equipment under test (EUT);
- EMI filters;
- RF signal generator(s);

NOTE 1 It is often useful to monitor the forward and backward power into the TEM waveguide when establishing field levels. A directional coupler along with a RF voltmeter or power meter allows the measurement of actual forward power to a TEM waveguide (as opposed to nominal power of the RF signal generator). Both must cover the intended bandwidth.

- power amplifiers;
- field sensors, capable of separately monitoring the electric field along all three orthogonal axes. Any probe-head circuitry and opto-electronics shall have adequate immunity to the field strength to be measured and a fibre-optic link to the indicator outside the TEM waveguide. An adequately filtered signal line may also be used;

NOTE 2 TEM waveguides require a field probe that allows the electric field to be measured individually along all three orthogonal axes. If a small single-axis antenna is used, it must be repositioned to measure each field component separately.

- associated equipment to record the power levels

B.2.1 Description of the test facility

NOTE A TEM cell acts itself as a shielded enclosure. In the case of a stripline (open), the stripline should be located in a larger shielded enclosure to ensure isolation. This shielding enclosure may require an appropriate amount of absorbing material in order for the stripline to fulfil uniform area requirements.

For TEM waveguides, the TEM mode is equivalent to an incident plane wave for the purposes of immunity testing. Whereas an ideal plane wave is invariant over any constant phase front, the TEM mode fields in a transmission line will vary over a constant phase front in accordance with the particulars of the cross-section geometry. Both anechoic chamber and TEM waveguide method are based on a plane wave field distribution before the EUT is inserted. A TEM mode-field pattern is more similar to vertical polarization in an anechoic chamber, while in a chamber the field pattern in horizontal polarization is more prone to distortion caused by ground plane reflections.

B.2.2 Étalonnage du champ

Cette section utilise le concept de «zone uniforme» qui est un plan vertical hypothétique par rapport à la direction de propagation du champ dans lequel les variations de l'amplitude du champ sont d'une valeur faible de niveau acceptable (voir [15]). Les dimensions du guide d'onde TEM déterminent la taille de cette zone uniforme (plane), à moins que l'appareil en essai ne puisse être complètement éclairé sur une surface plus faible. La taille maximale de l'appareil en essai est liée à la taille du «volume d'essai utilisable» (voir 5.1.2).

NOTE 1 Le plan vertical part de l'hypothèse selon laquelle la direction de propagation du mode TEM est presque horizontale (alignée avec l'axe z). Si la direction de propagation du mode TEM est dans une autre direction, le plan de zone uniforme peut être réorienté en conséquence.

L'utilisation d'une ligne de transmission évite les perturbations dues aux champs réfléchis par le sol des chambres semi-anéchoïques; ainsi des champs uniformes peuvent être établis au voisinage des conducteurs intérieur et extérieur (dans la direction normale seulement).

En principe la zone uniforme peut être située à n'importe quelle distance de l'accès d'entrée; l'emplacement dépendra de la géométrie spécifique du guide d'onde. La zone uniforme est uniquement valable pour cette distance, à partir de l'accès d'entrée au niveau duquel elle est étalonnée. Pour permettre la rotation de l'appareil en essai, la zone uniforme doit être espacée d'une distance au moins supérieure à la plus grande dimension de l'enveloppe à partir de l'extrémité du volume d'essai utilisable z_{max} défini en 5.1.2.

La zone uniforme est étalonnée dans l'enveloppe vide, sur la gamme des fréquences spécifiées en 5.1.1 en paliers de fréquences spécifiés en 5.1.1 en utilisant un signal non modulé.

En fonction de la taille de la zone uniforme, elle est étalonnée au moins avec un nombre de points de mesure conforme au Tableau B.1 et à la Figure B.2. Un champ est considéré comme uniforme si les exigences suivantes sont satisfaites:

- a) l'amplitude de la composante de champ électrique primaire sur la zone définie se situe dans une limite de ${}^{-0}_{+6}$ dB de la composante nominale de champ primaire sur au moins 75 % des points mesurés;
- b) les amplitudes des deux composantes de champ électrique secondaire (non voulues) sont au moins inférieures de 6 dB à la composante primaire sur au moins 75 % des points mesurés (voir 5.1.1).

Les 75 % de points qui satisfont à la première exigence n'ont pas à être identiques aux 75 % de points qui satisfont à la deuxième exigence. A différentes fréquences, différents points mesurés peuvent être dans la tolérance. La tolérance a été exprimée comme ${}^{-0}_{+6}$ dB pour assurer que l'amplitude du champ ne tombe pas sous la valeur nominale. La tolérance de 6 dB est considérée comme la valeur minimale pouvant être obtenue avec les installations d'essai réelles.

Une tolérance sur la composante de champ électrique primaire supérieure à ${}^{-0}_{+6}$ dB allant jusqu'à ${}^{-0}_{+10}$ dB, ou un niveau de composante de champ électrique secondaire atteignant jusqu'à -2 dB de la composante de champ primaire, est autorisée pour un pourcentage maximal de fréquences d'essai définies en 5.1.1, dans la mesure où la tolérance et les fréquences réelles sont indiquées dans le rapport d'essai.

B.2.2 Calibration of field

This section uses the concept of a "uniform area" which is a hypothetical vertical plane to the propagation direction of the field in which variations of the field magnitude are acceptably small (see [15]). The TEM waveguide dimensions determine the size of this uniform area (plane), unless the EUT can be fully illuminated in a smaller surface. The maximum size of an EUT is related to the size of the "usable test volume" (see 5.1.2).

NOTE 1 The vertical plane assumes that the direction of TEM mode propagation is near horizontal (aligned to the z-axis). If the TEM mode propagation direction is in some other direction, the uniform area plane may be re-orientated accordingly.

The use of a transmission line avoids perturbation due to semi-anechoic chamber ground-reflected fields; thus, uniform fields may be established in the vicinity of the inner and outer conductors (in the normal direction only).

In principle, the uniform area may be located at any distance from the input port; the location will depend on the specific waveguide geometry. The uniform area is valid only for that distance from the input port at which it is calibrated. To allow EUT rotation, the uniform area shall be spaced a distance at least greater than the largest case dimension away from the end of the usable test volume z_{max} defined in 5.1.2.

The uniform area is calibrated in the empty enclosure, over the frequency range specified in 5.1.1 in frequency steps specified in 5.1.1 using a non-modulated signal.

Depending on the size of the uniform area it is calibrated at least with a number of measurement points according to Table B.1 and Figure B.2. A field is considered uniform if the following requirements are fulfilled:

- a) the magnitude of the primary electric field component over the defined area is within ${}^{-0}_{+6}$ dB of the nominal primary field component, over at least 75 % of the measured points;
- b) the magnitudes of both secondary (unintended) electric field components are at least 6 dB less than the primary component, over at least 75 % of the measured points (see 5.1.1).

The 75 % of points fulfilling the first requirement does not need to be identical with the 75 % of points fulfilling the second requirement. At different frequencies, different measured points may be within the tolerance. The tolerance has been expressed as ${}^{-0}_{+6}$ dB to ensure that the field strength does not fall below nominal. The 6 dB tolerance is considered to be the minimum achievable in practical test facilities.

A primary electric field component tolerance greater than ${}^{-0}_{+6}$ dB up to ${}^{-0}_{+10}$ dB, or a secondary electric field component level up to –2 dB of the primary field component, is allowed for a maximum percentage of test frequencies as defined in 5.1.1, provided that the actual tolerance and frequencies are stated in the test report.

Tableau B.1 – Points d'étalonnage de la zone uniforme

Dimensions	Disposition et nombre de points de mesure	Nombre de points pour satisfaire au critère –0 dB à +6 dB
1,5 m × 1,5 m	$4 \times 4 = 16$	12
1,0 m × 1,5 m	$3 \times 4 = 12$	9
1,0 m × 1,0 m	$3 \times 3 = 9$	7
0,5 m × 1,0 m	$2 \times 3 = 6$	5
0,5 m × 0,5 m	$4 + 1(\text{centre}) = 5$	4
0,25 m × 0,25 m	$4 + 1(\text{centre}) = 5$	4

Les zones que ne figurent pas au Tableau B.1 doivent être étalonnées en utilisant un nombre de grilles défini par la plus petite grille de 0,5 m contenant la zone proposée (par exemple, une zone de 20 cm × 20 cm utilisant $4 + 1(\text{centre}) = 5$ points, une zone de 80 cm × 80 cm utilisant $3 \times 3 = 9$ points et une zone de 1,2 m × 0,6 m utilisant $4 \times 3 = 12$ points). L'espacement de grille doit être uniforme le long de chaque côté (par exemple, 1,2 m × 0,6 m de zone uniforme doit utiliser une taille de cellule de base de 0,4 m × 0,3 m). Comme indiqué ci-dessus, au moins 75 % des points de mesure doivent remplir le critère d'uniformité (par exemple pour une grille de 12 points une conformité de 9 points est exigée). Dans le montage d'essai, la face de l'appareil en essai doit être éclairée de manière coïncidente avec le plan.

NOTE 2 La prescription d'une zone uniforme est fondée sur la méthode de validation du mode TEM de 5.1.1. En principe, l'uniformité de champ est vérifiée en termes de composante de champ primaire en mode TEM. Si le champ résultant est utilisé à la place, toutes les exigences mentionnées ci-dessus doivent être satisfaites et il est nécessaire de démontrer que les exigences sur les composantes secondaires de 5.1.1 sont satisfaites. D'autres informations concernant l'homogénéité de champ sont données en [17].

La procédure de réalisation de l'étalonnage est connue comme la méthode «à puissance transmise constante» et comprend les étapes suivantes:

- positionner le capteur de champ électrique isotrope à l'un des points de la grille;
- appliquer une puissance incidente à l'accès d'entrée du guide d'onde TEM de manière à ce que le champ électrique de la composante de champ primaire soit comprise entre 3 V/m et 10 V/m, sur toute la gamme de fréquences spécifiée en 5.1.1 en paliers de fréquences spécifiés en 5.1.1, et enregistrer toutes les valeurs lues de puissance transmise, et de champs de composantes primaire et secondaires;

- avec la même puissance incidente, mesurer et enregistrer les amplitudes de champs primaire et secondaires aux points restants de la grille;

NOTE 3 Il convient que la plus grande dimension du capteur d'étalonnage soit inférieure à 10 % de la distance séparant le conducteur intérieur et le conducteur extérieur. Dans ce cas, toute perturbation de champ peut être négligée. Des détails supplémentaires sont donnés en [18].

- en tenant compte de tous les points de la grille, supprimer un maximum de 25 % (4 sur 16, 2 sur 9, 1 sur 5) des points de grille présentant l'écart le plus important par rapport à la valeur moyenne de la composante de champ primaire, exprimée en V/m;
- l'amplitude de composante de champ primaire des points restants doit se situer dans une plage de 6 dB. Le niveau des composantes de champ secondaire ne doit pas dépasser – 6 dB de la composante de champ primaire à chacun de ces points;

Table B.1 – Uniform area calibration points

Dimensions	Layout and number of measurement points	Number of points to fulfil the –0 dB to +6 dB criterion
1,5 m × 1,5 m	4 × 4 = 16	12
1,0 m × 1,5 m	3 × 4 = 12	9
1,0 m × 1,0 m	3 × 3 = 9	7
0,5 m × 1,0 m	2 × 3 = 6	5
0,5 m × 0,5 m	4 + 1(centre) = 5	4
0,25 m × 0,25 m	4 + 1(centre) = 5	4

Areas not listed in Table B.1 shall be calibrated using a grid number defined by the smallest 0,5 m grid fully containing the proposed area (for example, a 20 cm × 20 cm area using 4 + 1(centre) = 5 points, a 80 cm × 80 cm area using 3 × 3 = 9 points, and a 1,2 m × 0,6 m area using 4 × 3 = 12 points). Grid spacing shall be uniform along each side (for example, 1,2 m × 0,6 m uniform area shall use a 0,4 m × 0,3 m basic cell size). As outlined above, at least 75 % of the measurement points shall fulfil the uniformity criterion (for example, for a 12-point grid 9-point compliance is required). In the test set-up, the EUT shall have its face illuminated coincident with this plane.

NOTE 2 The requirement of a uniform area is based on the TEM mode validation method of 5.1.1. In principle, the field uniformity is verified in terms of the primary TEM mode field component. If the resultant field strength is used instead, all above-mentioned requirements have to be fulfilled, and it must be shown that the requirements on the secondary components of 5.1.1 are fulfilled. Further information about field homogeneity is given in [17].

The procedure for carrying out the calibration is known as the “constant forward power” method and is as follows:

- position the isotropic electric field strength sensor at one of the points in the grid;
- apply a forward power to the TEM waveguide input port so that the electric field strength of the primary field component is in the range 3 V/m to 10 V/m, through the frequency range specified in 5.1.1 in frequency steps specified in 5.1.1, and record all the forward power, primary and secondary components field strength readings;
- with the same forward power, measure and record the primary and secondary field strengths at the remaining grid points;

NOTE 3 The largest dimension of the calibration sensor should be smaller than 10 % of the distance between the inner and outer conductor. In this case, any field perturbation can be neglected. More details are given in [18].

- taking all grid points into consideration, delete a maximum of 25 % (4 of 16, 2 of 9, 1 of 5) of those grid points with the greatest deviation from the mean value of the primary field component, expressed in V/m;
- the primary field component magnitude of the remaining points shall lie within a range of 6 dB. The level of the secondary field components shall not exceed –6 dB of the primary field component at each of these points;

- f) parmi les points restants, prendre comme référence la position correspondant à la composante de champ primaire la plus basse (ceci assure que l'exigence $_{+6}^{-0}$ dB est satisfaite);
- g) à partir de la connaissance de la puissance transmise et de l'intensité du champ, on peut calculer la puissance incidente nécessaire à la valeur du champ d'essai exigée (par exemple si en un point donné, 81 W donne 9 V/m, alors 9 W sont nécessaires pour 3 V/m). Ceci doit être enregistré.

Comme alternative, une procédure équivalente consiste à établir une amplitude de champ électrique constante de la composante primaire dans la gamme allant de 3 V/m à 10 V/m et à enregistrer la puissance incidente délivrée à l'accès d'entrée. Les principes exposés dans les grandes lignes en a), d), e), f) et g) doivent être respectés. Cette méthode est connue comme la méthode "d'amplitude constante du champ".

L'étalonnage est valable pour tous les appareils en essai dont les faces individuelles (y compris tout le câblage) peuvent être complètement englobées dans la «zone uniforme». Il est prévu que l'étalonnage de la zone uniforme complète soit réalisé annuellement ou lorsque des modifications ont été apportées à la configuration de l'enveloppe (cellule TEM ou ligne ouverte à l'intérieur d'une enceinte blindée).

B.2.3 Niveaux d'essai

Les niveaux d'essai sont donnés pour servir de lignes directrices.

Tableau B.2 – Niveaux d'essai

Niveau d'essai	Champ d'essai V/m
1	1
2	3
3	10
X	spécial
NOTE X est un niveau d'essai ouvert. Ce niveau peut être indiqué dans la spécification de produit.	

B.2.4 Harmoniques

A l'étude.

NOTE Certains guides d'onde TEM peuvent présenter des résonances à des fréquences supérieures à la fréquence utile supérieure recommandée. L'ISO 11452-3 exige l'installation d'un filtre passe-bas d'au moins 60 dB à des fréquences supérieures à 1,5 fois la fréquence de coupure du guide d'onde TEM.

- f) of the remaining points, take the location with the lowest primary field component as the reference (this ensures the $^{-0}_{+6}$ dB requirement is met);
- g) from knowledge of the forward power and the field strength, the necessary forward power for the required test-field strength can be calculated (for example, if at a given point 81 W gives 9 V/m, then 9 W is needed for 3 V/m). This shall be recorded.

Alternatively, an equivalent procedure is to establish a constant primary component electric field strength in the range of 3 V/m to 10 V/m and record the forward power delivered to the input port. The principles outlined in a), d), e), f) and g) shall be respected. This method is known as the “constant-field-strength” method.

The calibration is valid for all EUTs whose individual faces (including any cabling) can be fully enclosed by the “uniform area”. It is intended that the full uniform area calibration be carried out annually or when changes have been made to the enclosure configuration (TEM cell or stripline within a shielded enclosure).

B.2.3 Test levels

The test levels are given for guidance.

Table B.2 – Test levels

Test level	Test-field strength V/m
1	1
2	3
3	10
X	Special
NOTE X is an open test level. This level may be given in the product specification.	

B.2.4 Harmonics

Under consideration.

NOTE Some TEM waveguides may have resonances at frequencies higher than the recommended upper useful frequency. ISO 11452-3 requires the installation of a low-pass filter of at least 60 dB at frequencies above 1,5 times the cut-off frequency of the TEM waveguide.

B.3 Montage d'essai

B.3.1 Installation d'un matériel de table

Pour les guides d'onde TEM, au lieu d'utiliser une table non-conductrice de 0,8 m de hauteur, le matériel est placé sur un support d'essai (voir 3.1.16) ou un manipulateur (voir 3.1.21) de forme et de dimensions adaptées, de manière à ce que la face avant soit située à l'intérieur de la zone de champ uniforme pour chaque position. Un montage de l'appareil en essai type est représenté à la Figure B.1.

B.3.2 Installation d'un matériel posé sur le sol

Pour les guides d'onde, le matériel est placé sur un support d'essai de telle manière que la face avant soit à l'intérieur de la zone de champ uniforme. L'utilisation de supports d'essai empêche la mise à la masse accidentelle de l'appareil en essai et la distorsion du champ. Le support du montage d'essai doit être de préférence entièrement non-conducteur, plutôt que d'être un revêtement isolant disposé sur une structure métallique.

B.3.3 Installation des câbles

NOTE Les appareils en essai de grande taille sont à l'étude, et par conséquent la disposition du câblage aussi.

Le câblage reste exposé au champ électromagnétique sur une distance de 1 m à partir de l'appareil en essai et il est placé au-dessus du sol soit au niveau de l'appareil en essai soit le long d'une diagonale dans le plan xy, jusqu'au point de sortie dans le conducteur extérieur du guide d'onde TEM (cellule TEM: paroi, sol). On doit éviter de disposer les câbles dans la direction z le long du conducteur extérieur ou intérieur. Les câbles disposés parallèlement au conducteur intérieur ou extérieur du guide d'onde TEM, doivent être espacés du conducteur d'au moins 0,1 m. Les câbles de sortie sont terminés par des pinces absorbantes (voir A.5.2). La terminaison du câble de sortie est placée à la limite de la zone uniforme. Pour avoir un guide sur les caractéristiques de pince absorbante, voir les descriptions dans la CISPR 16-1.

B.4 Procédures d'essai

L'essai doit être normalement réalisé avec chacun des quatre côtés de l'appareil en essai faisant face à l'accès venant du générateur.

Pour les guides d'onde TEM, le champ électrique est polarisé dans une seule direction (normalement verticalement). Ainsi, pour assurer que l'appareil en essai est complètement exposé à l'équivalent à la fois de la polarisation horizontale et de la polarisation verticale, il est nécessaire de lui faire effectuer une rotation. Par exemple, pour un champ électrique polarisé verticalement, les expositions en polarisation horizontale équivalentes sont obtenues d'abord en appliquant une rotation de 90° à l'appareil en essai autour de l'axe perpendiculaire à la zone uniforme (direction de la propagation du mode TEM) afin de réorienter la première face de l'appareil en essai, puis en lui appliquant trois rotations autour de l'axe horizontal aligné sur la zone uniforme, pour exposer les autres faces de l'appareil en essai (Figure B.1). Ceci peut exclure les essais dans certains guides d'onde TEM d'un appareil en essai qui dépend de l'orientation.

Sinon, le guide d'onde TEM peut faire l'objet d'une rotation autour de l'appareil en essai ou un guide d'onde TEM à polarisation multiple (Figure A.9) peut être utilisé de manière à obtenir la même polarisation.

B.3 Test set-up

B.3.1 Arrangement of table-top equipment

For TEM waveguides, rather than using a 0,8 m high non-conducting table, the equipment is placed on a test set-up support (see 3.1.16) or manipulator (see 3.1.21) of a proper shape and size such that the front face lies within the uniform field area in each position. A typical EUT set-up is shown in Figure B.1.

B.3.2 Arrangement of floor-standing equipment

For waveguide, the equipment is placed on a test set-up support in such a way that the front face lies within the uniform field area. The use of test set-up supports prevents accidental earthing of the EUT and distortion of the field. The test set-up support shall be bulk non-conducting, rather than an insulating coating on a metallic structure.

B.3.3 Arrangement of wiring

NOTE Large EUTs are under consideration and therefore also their cable routing.

Wiring is left exposed to the electromagnetic field for a distance of 1 m from the EUT and is routed above the floor, at either EUT level or along a diagonal in the xy-plane, to the exit point in the TEM waveguide outer conductor (TEM cell: wall, floor). Routing cable in the z-direction along the outer or inner conductor shall be avoided. Cables routed parallel to the inner or outer conductor of the TEM waveguide shall be spaced a minimum of 0,1 m away from the conductor. Exit cables are terminated by absorbing clamps (see A.5.2). The termination of the exit cable is placed at the borderline of the uniform area. For guidance on absorbing clamp characteristics, see the descriptions in CISPR 16-1.

B.4 Test procedures

The test shall normally be performed with each of the four sides of the EUT facing the generator port.

For TEM waveguides, the electric field is polarized in a single direction (typically vertically). Thus, to ensure that the EUT is fully exposed to the equivalent of both the horizontal and vertical polarization it is necessary to rotate the EUT. For example, for a vertically polarized electric field the equivalent horizontal polarization exposures are achieved by first rotating the EUT 90° around the axis perpendicular to the uniform area (direction of TEM mode propagation) to reorientate the first EUT face, followed by three rotations about the horizontal axis aligned with the uniform area to expose the other EUT faces (Figure B.1). This may preclude the testing in some TEM waveguides of an EUT which is orientation dependent.

Alternatively, the TEM waveguide may be rotated around the EUT or a multiple-polarization TEM waveguide (Figure A.9) may be used in such a manner as to achieve the same polarization.

Le pas de fréquence doit être 1 % de la fréquence précédente. Le temps de palier à chaque fréquence de la porteuse modulée en amplitude ne doit pas être inférieur au temps nécessaire à l'EST pour être mis à l'épreuve et pouvoir réagir, et ne doit en aucun cas être inférieur à 0,5 s. Cependant un temps de palier de 1 s est conseillé.

NOTE Si un appareil en essai comprend plusieurs éléments, il faut veiller à ce que les positions relatives des éléments soient conservées au cours des rotations. Ceci peut nécessiter une disposition soignée de l'appareil en essai et la fixation de ses éléments et câbles sur un support de montage d'essai ou un manipulateur.

Les gammes de fréquences à considérer doivent être couvertes par pas de fréquences, suivant l'exigence ci-dessus, avec le signal modulé en amplitude à 80 % par une onde sinusoïdale de 1 kHz, en respectant des pauses pour ajuster le niveau du signal r.f. ou pour commuter les oscillateurs et les antennes comme il convient.

B.5 Résultats et rapport d'essai

A l'étude.

En plus du contenu habituel du rapport d'immunité aux perturbations rayonnées, des précisions concernant la taille, le type et les méthodes de vérification du guide d'onde TEM doivent être indiquées.

The frequency step size shall be 1 % of the previous frequency. The dwell time at each frequency shall not be less than the time necessary for the EUT to be exercised and to respond, but shall in no case be less than 0,5 s. However, a dwell time of 1 s is advisable.

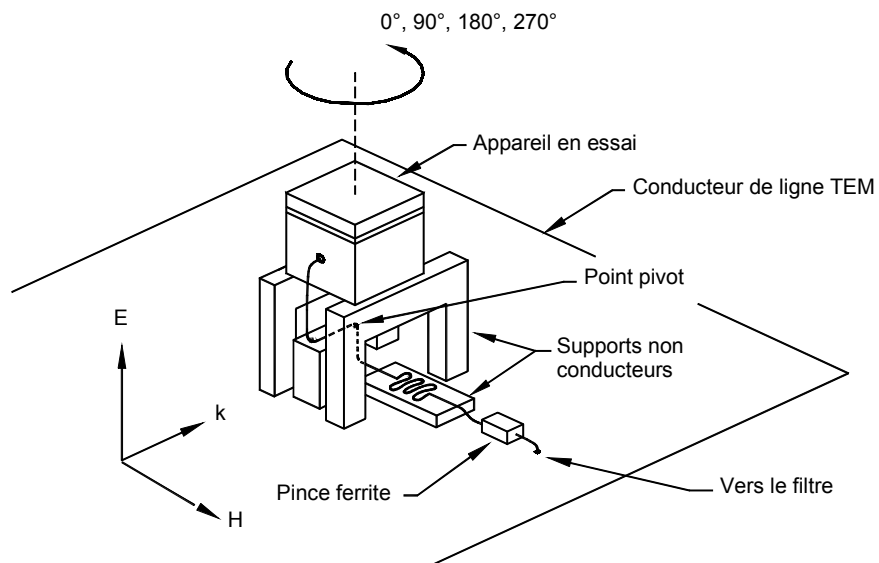
NOTE If an EUT consists of several components, care must be taken that the relative component positions are preserved during rotations. This may require careful restraint of the EUT and the fastening of its components and cables to a test set-up support or manipulator.

The frequency ranges to be considered are to be covered in frequency steps, according to the above requirement, with the signal 80 % amplitude modulated with a 1 kHz sine wave, pausing to adjust the r.f. signal level or to switch oscillators as necessary.

B.5 Test results and test report

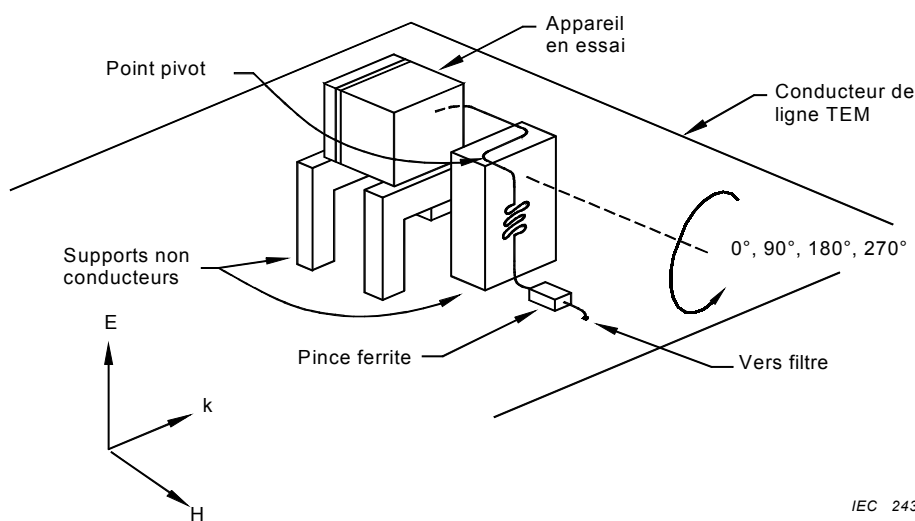
Under consideration.

In addition to the usual radiated immunity report contents, details about the TEM waveguide size, type, and verification methods shall be reported.



IEC 242/03

a) Polarisation verticale



IEC 243/03

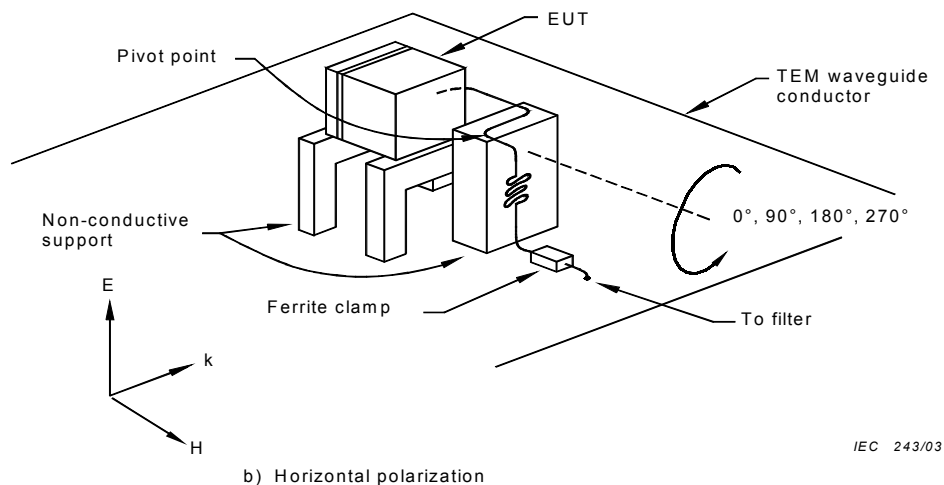
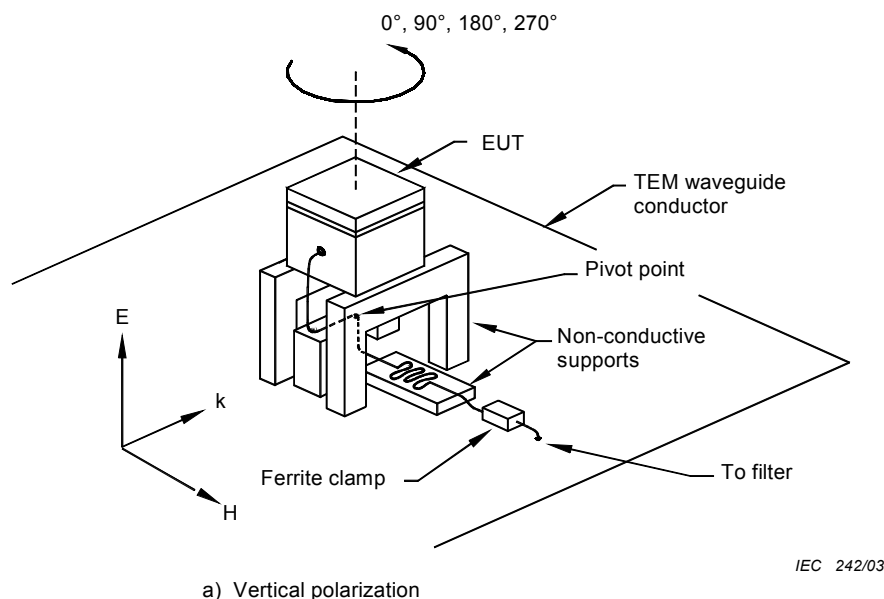
b) Polarisation horizontale

E composante de champ primaire
H champ magnétique
K direction de propagation (vecteur d'onde)

NOTE 1 Les appareils en essai de grande taille sont à l'étude, et par conséquent la disposition du câblage aussi.

NOTE 2 Il est nécessaire que disposition du câble du côté filtre du point pivot reste fixe. Les supports du montage d'essai (3.1.16) peuvent être repositionnés selon nécessité au cours des rotations. Il convient que les supports du montage d'essai aient une épaisseur de 0,1 m. Les appareils en essai à unités multiples seront fixés sur un support de montage d'essai ou une plate-forme équivalente et seront soumis, de la même manière, à une rotation. Les manipulateurs et les guides d'onde TEM pouvant subir des rotations (voir [6]) ou à polarisation multiple (Figure A.9), et qui obtiennent le même ensemble d'appareils en essai par rapport aux polarisations de champ incident, peuvent être utilisés.

Figure B.1 – Exemple de montage d'essai pour guides d'onde TEM à polarisation unique



Key

- E Primary electric field component
- H Magnetic field
- k Propagation direction (wave vector)

NOTE 1 Large EUTs are under consideration and therefore also their cable routing.

NOTE 2 The cable layout on the filter side of the pivot point must remain stationary. The test set-up supports (3.1.16) may be repositioned as necessary during rotations. The test set-up supports should be 0,1 m thick. Multiple-unit EUTs must be affixed to a test set-up support or an equivalent platform and rotated in the same manner. Manipulators and rotatable (see [6]) or multiple-polarization TEM waveguides (Figure A.9) which achieve the same set of EUT to incident field polarizations may be used.

Figure B.1 – Example of test set-up for single-polarization TEM waveguides

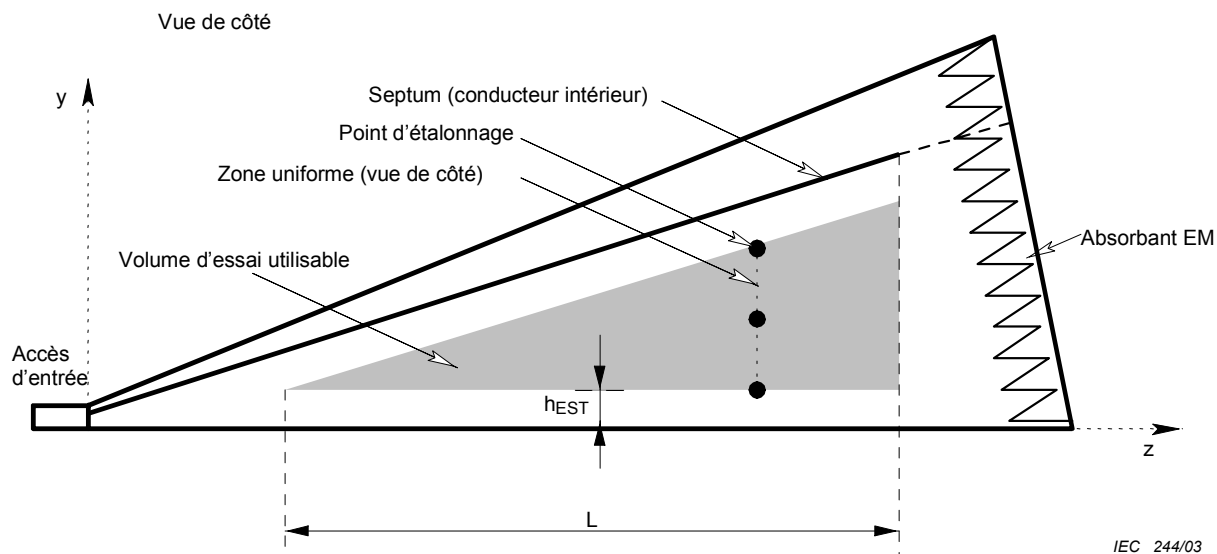


Figure B.2a – Vue de côté

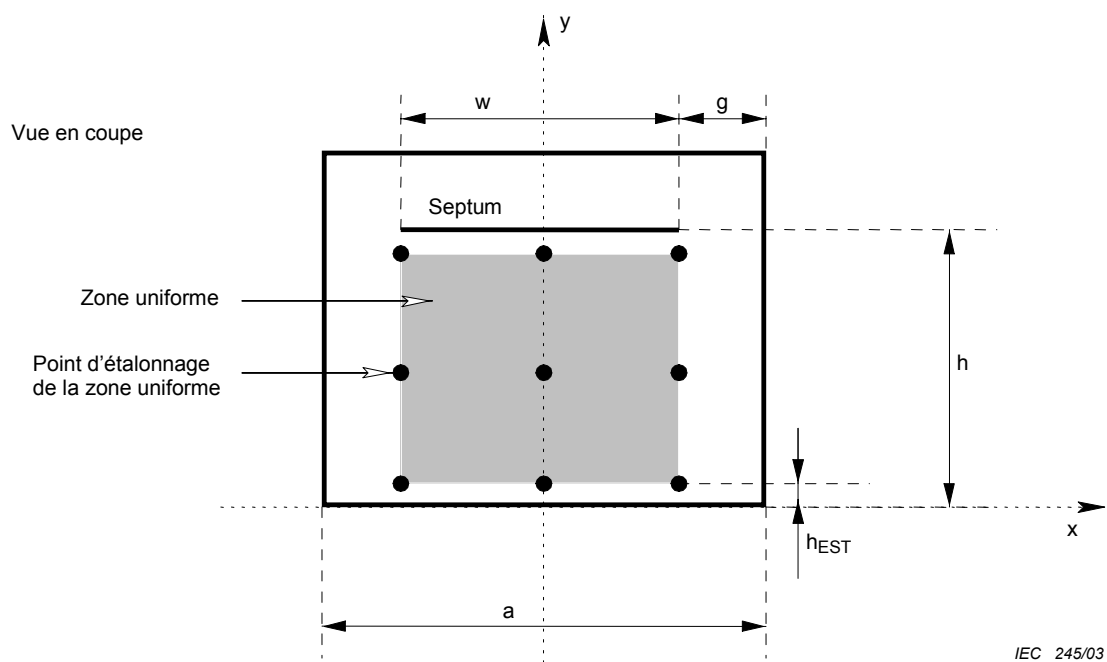


Figure B.2b – Section transversale

NOTE Exemple d'une zone uniforme avec 3×3 points d'étalonnage dans une cellule GTEM conforme à B.2.2. La Figure B.2b montre la taille maximale possible de la zone uniforme. La limite de la zone uniforme (plane) est donnée par les points d'étalonnage extérieurs. Les points d'étalonnage ne peuvent pas être à l'extérieur du volume d'essai utilisable (voir 5.1.2 et les Figures A.6 à A.9).

Figure B.2 – Points d'étalonnage de la zone uniforme dans un guide d'onde TEM

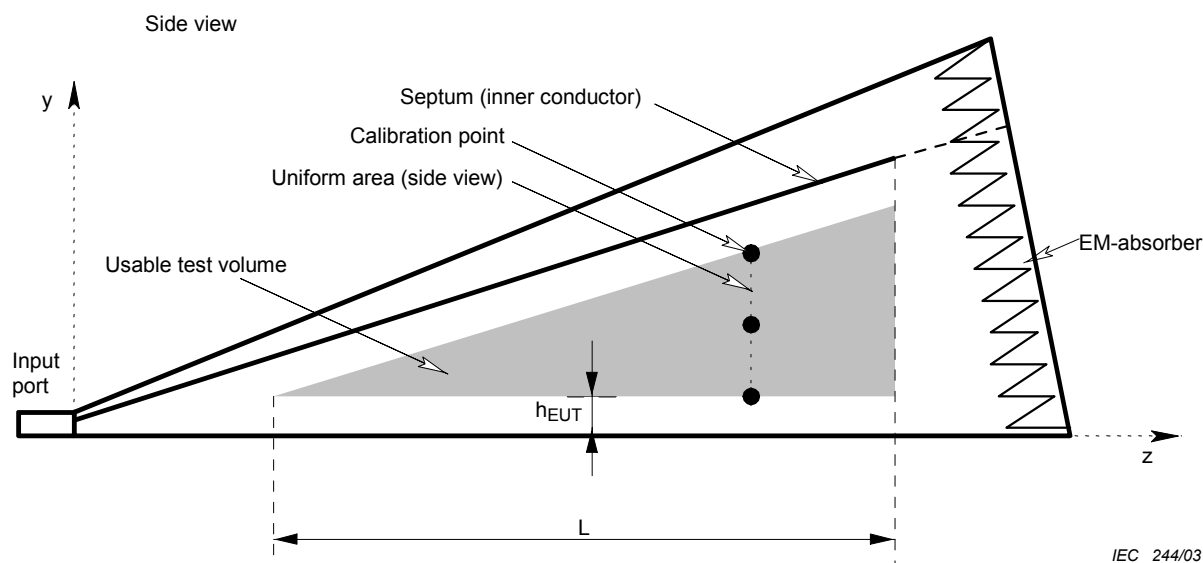


Figure B.2a – Side view

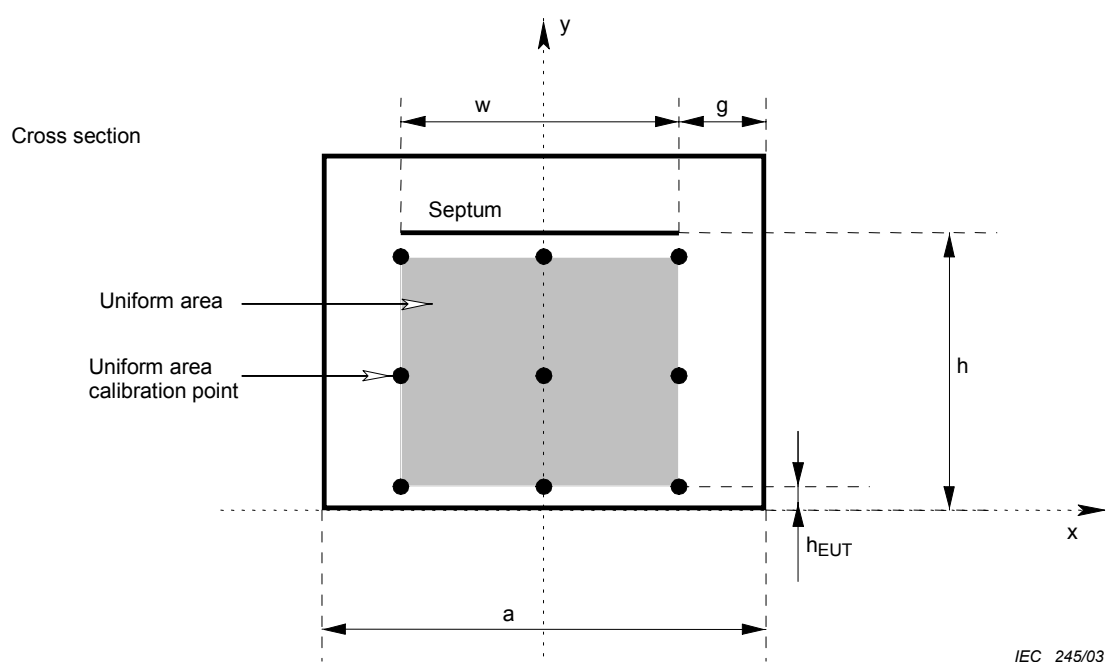


Figure B.2b – Cross-section

NOTE Example for a uniform area with 3×3 calibration points in a GTEM cell according to B.2.2. Figure B.2b shows the maximum possible size of the uniform area. The boundary of the uniform area (plane) is given by the outer calibration points. The calibration points cannot be outside the usable test volume (see 5.1.2 and Figures A.6 to A.9).

Figure B.2 – Uniform area calibration points in TEM waveguide

Annexe C (normative)

Essais de transitoires IEM-HA dans les guides d'onde TEM

C.1 Introduction

Cette annexe a été établie pour spécifier les essais d'immunité aux impulsions électromagnétiques à haute altitude (IEM-HA) pour les matériels et systèmes électriques et électroniques. Le but recherché est de permettre aux fabricants de qualifier des matériels et des systèmes de petite taille et d'utiliser un grand nombre des essais d'immunité CEI de laboratoire qui ont déjà été prescrits pour d'autres questions de CEM.

Il convient de noter que dans le domaine IEM-HA, le terme «simulateur» est souvent utilisé pour décrire de nombreux types différents d'installations d'essai qui peuvent produire le bon environnement IEM-HA incident (voir la CEI 61000-4-32). Dans cette annexe, le terme fait référence uniquement aux guides d'onde TEM qui produisent une forme d'onde IEM-HA.

Même si cette annexe est destinée à décrire les exigences d'essai IEM-HA dans les guides d'onde TEM de manière homogène avec d'autres types d'essais réalisés dans les guides d'onde TEM, elle couvre les essais en transitoires qui, de par leur nature, diffèrent beaucoup des essais en ondes entretenues. Lorsque les exigences d'essai IEM-HA de la présente annexe diffèrent de celles décrites dans le corps de la présente norme, elles doivent remplacer toutes les autres.

C.2 Essais d'immunité

Les essais d'immunité IEM-HA se composent de deux types principaux: essais d'immunité aux perturbations rayonnées et essais d'immunité aux perturbations conduites. Pour les besoins du présent document, le terme «matériel électronique» indique un appareil qui réalise une fonction spécifique. Il pourrait s'agir d'un petit ordinateur ou d'un téléphone. Certains matériels (par exemple, un ordinateur connecté à des périphériques complémentaires tels que les panneaux de commande pour le contrôle des processus dans une usine) peuvent être considérés comme faisant partie d'un système plus important. Souvent, les matériels électroniques sont relativement petits – de l'ordre de 1 m × 1 m × 1 m ou plus petit. Il est prévisible que la plupart des essais sur de tels matériels de petite taille seront réalisés dans des laboratoires en utilisant des simulateurs d'injection de courant et des guides d'onde TEM.

En l'absence d'objet dans le simulateur, le champ électrique à l'intérieur du volume d'essai est une onde comparable à une onde plane, avec un historique de durée d'impulsion bi-exponentielle décrite par une onde 2,5/25 ns, c'est-à-dire une onde unipolaire avec un temps de montée de 10 % à 90 % de 2,5 ns, et une largeur d'impulsion égale à 25 ns. Cette forme d'onde est donnée par l'Equation (C.1) ci-dessous.

$$E(t) = E_{peak} \cdot k \cdot (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad \text{en } \frac{V}{m} \quad (C.1)$$

où

$$\alpha = 6,0 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$\beta = 4,0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

$$k = 1,3$$

E est la composante primaire du champ électrique en V/m;

Annex C (normative)

HEMP transient testing in TEM waveguides

C.1 Introduction

This annex has been developed to specify the high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) immunity test for electrical or electronic equipment and systems. The intent is to allow manufacturers to qualify equipment and small systems and to use many of the same IEC laboratory immunity tests that are already prescribed for other EMC purposes.

It should be noted that in the HEMP community the term "simulator" is often used to describe many different types of test facilities that can generate the correct incident HEMP environment (see IEC 61000-4-32). In this annex, the term is understood to refer only to TEM waveguides that produce a HEMP waveform.

While this annex is intended to describe the HEMP testing requirements in TEM waveguides in a consistent fashion with other types of testing performed in TEM waveguides, this annex covers transient testing which by its nature differs from continuous wave testing in important ways. When HEMP test requirements in this annex differ from those described in the main body of this standard, the HEMP requirements shall supersede all others.

C.2 Immunity tests

HEMP immunity tests consist of two major types: radiated immunity tests and conducted immunity tests. For the purpose of this document, the term "electronic equipment" denotes an apparatus that performs a specific function. This could be a small computer or a telephone. Some equipment (for example, a computer connected to additional peripherals such as control boards to monitor processes in a factory) may be considered as part of a larger system. Often, electronic equipment is relatively small – of the order of 1 m × 1 m × 1 m or smaller. It is expected that most of the tests on such small equipment will be performed in laboratories using current injection simulators and TEM waveguides.

In the absence of an object in the simulator, the electric field in the test volume is a wave comparable to a plane wave, with a double exponential pulse time history described by a 2,5/25 ns wave, i.e. a unipolar wave with a 10 % to 90 % rise time of 2,5 ns and a pulse width equal to 25 ns. This waveform is given by the Equation (C.1) below.

$$E(t) = E_{peak} \cdot k \cdot (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (\text{C.1})$$

where

$$\alpha = 6,0 \times 10^8 \text{ s}^{-1};$$

$$\beta = 4,0 \times 10^7 \text{ s}^{-1};$$

$$k = 1,3;$$

E is the primary component of the electric field in V/m;

E_{peak} est la valeur de crête du champ électrique en V/m;

t est la durée en secondes (s);

E_{peak} est le niveau d'essai de sévérité choisi dans le Tableau C.1.

L'amplitude spectrale dans le domaine fréquentiel pour l'Equation (C.1) est donnée par l'Equation (C.2)

$$|E(f)| = \frac{E_{peak} \cdot k \cdot (\alpha - \beta)}{\sqrt{[(2\pi f) + \alpha][(2\pi f) + \beta]}} \quad \text{en } \frac{\text{V}}{\text{m Hz}} \quad (\text{C.2})$$

où f est la fréquence en hertz (Hz).

Pour les paramètres de forme d'onde donnés ci-dessus, l'amplitude spectrale dans le domaine fréquentiel de l'Equation (C.2) est représentée à la Figure C.1.

NOTE Pour des détails supplémentaires voir [23].

C.2.1 Installations d'essais en rayonnement

Des installations d'essai de petite taille peuvent plus facilement satisfaire aux spécifications de champs désirées, avec des tolérances plus faibles dans les variations de paramètres qu'avec les simulateurs de grande taille. Ces petites installations seront utilisées essentiellement pour les essais de matériels de taille relativement petite. Les tolérances pour la forme d'onde de l'impulsion IEM-HA initiale sur la totalité du volume d'essai de l'installation d'essai de petite taille, doivent être comme suit:

- le rapport de champ électrique de crête sur le champ magnétique de crête doit être égal à $\eta_0 = 377 \, \Omega \pm 50 \, \Omega$;
- le temps de montée entre 10 % et 90 % de la valeur de crête doit être de $2,25 \, \text{ns} \pm 0,25 \, \text{ns}$;
- le champ électrique doit augmenter de façon continue pendant le temps de montée de 10 % à 90 %;
- la largeur d'impulsion (le temps entre les points sur les fronts et les flancs arrière de l'impulsion à 50 % de E_{peak}) doit être de $27,5 \, \text{ns} \pm 2,5 \, \text{ns}$;
- l'amplitude de toute pré-impulsion du champ électrique doit être inférieure ou égale à 7 % de l'amplitude du champ de crête;
- les réflexions de champ électrique provenant de la terminaison du simulateur doivent être inférieures à 10 % de l'amplitude du champ de crête;
- les fluctuations dans le spectre de fréquences lissé du champ électrique au centre du volume d'essai ne doivent pas être supérieures à $\pm 3 \, \text{dB}$ par rapport au spectre théorique dans la largeur de bande comprise entre 100 kHz et 300 MHz;
- au moment de la valeur de crête du champ primaire, d'autres composantes électromagnétiques secondaires (voir 3.19) doivent être inférieures à 10 % de la valeur de crête du champ primaire. Il est reconnu que cette exigence est plus sévère que celle donnée en 5.1.1;
- le champ électrique de crête doit être uniforme dans le volume d'essai selon les critères suivants: le champ électrique de crête à l'intérieur du volume d'essai doit se situer dans la plage de E_{peak} et $2 E_{peak}$ dans le domaine temporel;
- pour évaluer les tolérances de champ, les mesures des champs électrique et magnétique au centre et aux huit coins du volume d'essai doivent être réalisées en l'absence de l'appareil en essai.

E_{peak} is the peak value of the electric field, in V/m;

t is the time in s;

E_{peak} is the severity test level selected from Table C.1.

The frequency-domain spectral magnitude for Equation (C.1) is given by Equation (C.2)

$$|E(f)| = \frac{E_{\text{peak}} \cdot k \cdot (\alpha - \beta)}{\sqrt{[(2\pi f) + \alpha][(2\pi f) + \beta]}} \quad \text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}} \frac{1}{\text{Hz}} \quad (\text{C.2})$$

where f is the frequency, in Hz.

For the waveform parameters given above, the frequency-domain spectral magnitude of Equation (C.2) is shown in Figure C.1.

NOTE For additional details see [23].

C.2.1 Radiated test facilities

Small test facilities can more easily meet the desired field specifications with smaller tolerances in parameter variations than large simulators. These small facilities will be used primarily to test relatively small equipment. Tolerances for the early-time HEMP pulse waveform over the entire test volume of the small test facility shall be as follows:

- the ratio of peak electric field to the peak magnetic field shall be equal to $\eta_0 = 377 \, \Omega \pm 50 \, \Omega$;
- the rise time between 10 % to 90 % of the peak value shall be $2,25 \, \text{ns} \pm 0,25 \, \text{ns}$;
- the electric field shall be continuously increasing during the 10 % to 90 % rise time;
- the pulse width (the time duration between points on the leading and trailing edges of the pulse at 50 % of E_{peak}) shall be $27,5 \, \text{ns} \pm 2,5 \, \text{ns}$;
- the magnitude of any pre-pulse of the electric field shall be equal to, or less than, 7 % of the magnitude of the peak field;
- electric field reflections from the terminator of the simulator shall be less than 10 % of the magnitude of the peak field;
- fluctuations in the smoothed frequency spectrum of the electric field at the centre of the test volume shall not be larger than $\pm 3 \, \text{dB}$ compared to the theoretical spectrum in the bandwidth between 100 kHz and 300 MHz;
- at the time of the peak value of the primary field, other secondary electromagnetic components (see 3.19) shall be smaller than 10 % of the peak value of the primary field. It is recognized that this requirement is more severe than that given in 5.1.1;
- the peak electric field shall be uniform in the test volume to within the following criteria: the peak electric field within the test volume shall be within the range of E_{peak} and $2 E_{\text{peak}}$ in the time domain;
- to evaluate the field tolerances, electric and magnetic field measurements at the centre and the eight corners of the test volume shall be performed in the absence of the EUT.

C.2.2 Exigences du spectre dans le domaine fréquentiel

En plus des exigences concernant les champs transitoires du simulateur IEM-HA, les exigences suivantes doivent être respectées sur le spectre dans le domaine fréquentiel des champs du simulateur:

- a) le spectre de fréquences doit être calculé en utilisant une forme d'onde transitoire échantillonnée de manière uniforme avec 4096 échantillons entre le début à 0 μ s et la fin à 2 μ s. Un spectre de fréquences à valeurs complexes de 4096 points doit être calculé en utilisant une FFT (transformée de Fourier rapide) ou une DFT (transformée de Fourier discrète) avec un intervalle d'échantillonnage de fréquences de 0,5 MHz, et une fréquence maximale de 1,0 GHz;
- b) le spectre du domaine fréquentiel doit être lissé en utilisant une moyenne de fenêtrage à cinq points (c'est-à-dire que le spectre doit être moyenné sur une fenêtre de 2 MHz);
- c) l'amplitude qui résulte du spectre lissé doit se situer dans les limites du niveau spécifié en dB du spectre de la forme d'onde spécifiée de l'Equation (C.2) et représenté à la Figure C.1.

NOTE La plupart des spectres de fréquences mesurés ont des valeurs nulles occasionnelles (ou «pertes de niveaux»), qui ne modifient pas de manière significative le comportement global de la forme d'onde transitoire. L'exigence selon laquelle le spectre de domaine fréquentiel lissé des simulateurs de petite et de grande taille se situe, respectivement, à ± 3 dB et ± 10 dB, provient de la reconnaissance de ce fait, et a pour but de permettre une valeur nulle occasionnelle dans le spectre. Les limites spectrales de ± 3 dB et ± 10 dB sont différentes car les simulateurs plus petits ont généralement des tolérances et une précision plus importantes des champs simulés.

C.3 Matériels d'essai

C.3.1 Instrumentation

La méthode de mesure doit comprendre l'utilisation d'une liaison de transmission à fibres optiques qui permet la mesure et la transmission des signaux vers un système de traitement des données, sans perturber le champ électromagnétique ambiant. Le système de mesure doit être intrinsèquement insensible aux rayonnements électromagnétiques émis par le simulateur. Le système de mesure a pour objets

- de fournir des mesures du champ de référence;
- de synchroniser l'IEM-HA simulée avec les modes opérationnels de l'appareil en essai comme exigé par l'utilisateur, et
- de fournir des mesures de tension et de courant de l'appareil en essai comme exigé par l'utilisateur.

La précision exigée pour le système de mesure global doit être dans des limites de $\pm 3,0$ dB sur une gamme de fréquences comprises entre 50 kHz et 500 MHz, et sa plage dynamique instantanée globale doit être d'au moins 40 dB.

Il est recommandé que le système de mesure présente les caractéristiques suivantes:

- il convient que le système de transmission de données ait au moins une largeur de bande minimale de 3 dB de 50 kHz à 1 GHz;
- il convient que le numériseur ou l'oscilloscope ait une largeur de bande minimale de 500 MHz et un taux d'échantillonnage minimal de 2 giga-échantillons par seconde avec une résolution de données minimale de 8 bits;
- il convient que les capteurs de champ électrique et magnétique aient une largeur de bande minimale de 3 dB de 50 kHz à 1 GHz. Voir la CEI 61000-4-23 pour plus d'informations concernant les conceptions appropriées pour les capteurs.

C.2.2 Frequency domain spectrum requirements

In addition to the requirements on the transient fields of the HEMP simulator, the following requirements shall be placed on the frequency domain spectrum of the simulator fields:

- a) the frequency spectrum shall be computed using a uniformly sampled transient waveform having 4096 samples between the starting time of 0 μ s and the ending time of 2 μ s. A 4096 point complex-valued frequency spectrum shall be calculated using an FFT (fast Fourier transform) or a discrete Fourier transform (DFT) with a frequency sampling interval of 0,5 MHz, and a maximum frequency of 1,0 GHz;
- b) the frequency domain spectrum shall be smoothed using a five-point windowing average (i.e., the spectrum is to be averaged over a 2 MHz window);
- c) the resulting magnitude of the smoothed spectrum shall lie within the specified dB level of the spectrum of the specified waveform of Equation (C.2) and shown in Figure C.1.

NOTE Most measured frequency spectra have occasional nulls (or "drop-outs"), which do not significantly alter the overall behaviour of the transient waveform. The requirement that the smoothed frequency domain spectrum of the small and large simulators lie within ± 3 dB and ± 10 dB, respectively, is made in recognition of this fact, and with the aim of permitting an occasional null in the spectrum. The spectral limits of ± 3 dB and ± 10 dB are different because the smaller simulators generally have higher tolerances and accuracy of the simulated fields.

C.3 Test equipment

C.3.1 Instrumentation

The measurement method shall involve the use of a fibre optic transmission link that permits signals to be measured and transmitted to a data processing system without disturbing the ambient EM field. The measurement system shall be intrinsically insensitive to electro-magnetic radiation emitted by the simulator. The purposes of the measurement system are

- to provide reference field measurements,
- to synchronize the simulated HEMP with the operational modes of the equipment under test as required by the user, and
- to provide EUT current and voltage measurements, as required by the user.

The required overall measurement system accuracy shall be within $\pm 3,0$ dB over a frequency range of 50 kHz to 500 MHz, and its overall instantaneous dynamic range shall be at least 40 dB.

It is recommended that the measurement system have the following characteristics:

- the data transmission system should have a minimum 3 dB bandwidth of 50 kHz to 1 GHz;
- the digitizer or oscilloscope should have a minimum bandwidth of 500 MHz and a minimum sampling rate of 2 gigasamples per second with a minimum data resolution of 8 bits;
- the electric and magnetic field sensors should have a minimum 3 dB bandwidth of 50 kHz to 1 GHz. See IEC 61000-4-23 for further information concerning appropriate sensor designs.

La mesure du champ de référence doit se composer des trois composantes de champ électrique orthogonales et des trois composantes de champ magnétique orthogonales pour permettre une évaluation du rapport entre le champ électrique et le champ magnétique, ainsi que des composantes du champ électromagnétique parasite. L'utilisateur peut également spécifier d'autres mesures de champs dans le volume d'essai.

C.4 Montage d'essai

Le volume d'essai d'un simulateur dépend de sa taille physique et des caractéristiques de la structure du guide d'onde TEM. Il est défini comme le volume dans lequel les champs électromagnétiques incidents satisfont ou dépassent les exigences d'intensité et d'uniformité, comme spécifié pour un essai IEM-HA simulé. Si l'appareil en essai est trop grand par rapport au volume d'essai, la réponse induite déviara de celle d'une illumination d'onde plane incidente, et les résultats de l'essai seront discutables.

Pour assurer la précision de la simulation, il est nécessaire de minimiser l'interaction entre le simulateur et l'appareil en essai en plaçant celui-ci assez loin des éléments rayonnants ou du guide d'onde du simulateur. Le matériel en essai doit être situé à une distance supérieure à 0,3 fois la dimension transversale globale par rapport aux conducteurs du guide d'onde TEM. Si l'appareil en essai doit être essayé pendant qu'il est placé sur un plan de sol, il doit être placé à une distance supérieure à 0,6 fois sa dimension transverse par rapport au septum.

L'appareil en essai est décrit généralement comme un volume fini ayant des dimensions déterminées par ses dimensions orthogonales les plus importantes en hauteur, largeur et longueur. L'appareil en essai doit tenir à l'intérieur du volume d'essai du simulateur comme défini ci-dessus. Si des conducteurs extérieurs «de faible longueur» qui sont associés à l'appareil en essai peuvent être éclairés de manière réaliste par le simulateur, alors ces câbles doivent également être utilisés pour déterminer le volume de l'appareil en essai. Si l'appareil en essai doit être soumis aux essais dans un mode en champ libre, c'est-à-dire sans être placé sur un plan de projection horizontal, alors il doit être placé sur un support diélectrique à l'intérieur du simulateur.

C.5 Procédure d'essai

Les essais d'immunité aux perturbations conduites et rayonnées peuvent être réalisés séparément. Il n'existe aucune exigence pour réaliser les essais des deux types de contraintes de manière simultanée.

Si le système complet y compris tous les conducteurs extérieurs «de faible longueur» peut être éclairé de manière réaliste dans un essai rayonné, les essais conduits précoces peuvent ne pas être exigés sur ces câbles. De plus, les essais conduits peuvent ne pas être nécessaires pour les accès par l'antenne, si l'antenne peut être essayée avec la contrainte IEM-HA simulée, l'antenne étant orientée pour une réponse maximale. Cependant, tous les accès connectés aux guides d'onde de puissance, de télécommunications ou aux autres guides d'onde de grande longueur doivent subir des essais d'immunité aux perturbations conduites.

Les essais d'immunité IEM-HA doivent être réalisés conformément à un plan d'essai qui décrit le matériel essayé, le niveau d'essai de sévérité et les formes d'onde, les conditions climatiques, les principaux modes de fonctionnement et les critères pour la satisfaction des exigences d'immunité. L'environnement ambiant (à la fois climatique et électromagnétique) du laboratoire ou de l'installation d'essai IEM-HA ne doit pas influencer les résultats d'essai. Au cours des essais, il est important de contrôler les matériels pour classer leurs performances comme spécifié. Si le matériel reçoit et envoie des données à d'autres matériels dans un système, un effort doit être fait pour envoyer et recevoir les mêmes données ou des données simulées avec le matériel en essai. Ceci doit permettre une évaluation des performances du matériel au cours de l'essai.

The reference field measurement shall consist of the three orthogonal electric and three orthogonal magnetic field components to permit an assessment of the electric to magnetic field ratio, as well as the spurious electromagnetic field components. The user may also specify other field measurements in the test volume.

C.4 Test set-up

The test volume of a simulator depends on its physical size and on the characteristics of the TEM waveguide structure. It is defined as the volume in which the incident electromagnetic fields meet, or exceed, the strength and uniformity requirements, as specified for a simulated HEMP test. If the equipment under test is too large in relation to the test volume, the induced response will deviate from that of an incident plane wave illumination, and the results of the test will be questionable.

To ensure the accuracy of the simulation, it is necessary to minimize the EUT-simulator interaction by locating the equipment under test far enough from the radiating or wave-guiding elements of the simulator. The equipment under test shall be located no closer than 0,3 times its overall transverse dimension to the conductors of the TEM waveguide. If the EUT is to be tested while resting on a ground plane, it shall be located no closer than 0,6 times its transverse dimension to the septum.

The EUT is described generally as a finite volume with dimensions determined by its greatest orthogonal dimensions in height, width and length. The EUT shall fit within the simulator test volume as defined above. If “short” external conductors that are associated with the EUT can be illuminated in a realistic manner by the simulator, then those cables shall also be used in determining the volume of the EUT. If the EUT is to be tested in a free-field mode, that is to say, not resting on a ground plane, then it shall be placed on a dielectric stand within the simulator.

C.5 Test procedure

Tests for conducted and radiated disturbance immunity may be performed separately. There are no requirements for testing both types of stresses simultaneously.

If the entire system including all “short” external conductors can be illuminated in a realistic manner in a radiated test, then the early-time conducted tests may not be required on those cables. Moreover, conducted tests may not be necessary for antenna ports, if the antenna can be tested to the simulated HEMP stress with the antenna oriented for a maximum response. However, all ports connected to power, telecom, or other long lines shall have conducted immunity tests.

HEMP immunity tests shall be conducted in accordance with a test plan that describes the equipment to be tested, the severity test level and waveforms, climatic conditions, major operational modes, and the criteria for passing the immunity requirements. The ambient environment (both climatic and electromagnetic) of the laboratory or HEMP test facility shall not influence the test results. During the testing it is important to monitor the equipment to classify its performance as specified. If equipment receives and sends data to other equipment in a system, an effort shall be made to send and receive the same or simulated data to the equipment being tested. This shall allow an evaluation of the equipment performance during the test.

Si l'appareil en essai ne satisfait pas aux exigences d'essai et si des mesures de diagnostic sont réalisées à l'intérieur du système ou du matériel, ces sondes ou câbles doivent être retirés et l'essai doit être réalisé à nouveau pour assurer que l'instrumentation ajoutée n'est pas la cause de la défaillance de l'essai. Le rapport d'essai doit clairement identifier la présence de tous les câbles extérieurs connectés à l'appareil en essai, selon qu'ils font partie du matériel ou du système de mesure.

L'appareil en essai doit être essayé dans chaque mode principal de fonctionnement spécifié dans le plan d'essai. Pour les essais d'immunité aux perturbations conduites, les formes d'ondes positives et négatives doivent être utilisées. Pour les essais d'immunité aux perturbations rayonnées, seule une polarité de forme d'onde est exigée.

Les essais de laboratoire doivent être réalisés avec les conditions d'environnement ambiantes données en C.5.1. Les essais *in situ* ne sont pas adaptés aux essais d'acceptation en matière d'immunité, mais ces essais peuvent être utilisés pour vérifier l'immunité du matériel installé ainsi que l'immunité du système. Pour les essais *in situ*, les conditions ambiantes décrites en C.5.1 sont souhaitables mais pas exigées.

C.5.1 Conditions climatiques

Les essais IEM-HA exigés doivent être réalisés dans les conditions climatiques normalisées conformément à la CEI 60068-1:

- température 15 °C à 35 °C
- humidité relative 25 % à 75 %
- pression atmosphérique 86 kPa à 106 kPa

D'autres plages de conditions climatiques doivent également être prises en compte si le matériel est conçu et/ou spécifié pour fonctionner pour ces conditions ou si l'essai doit être réalisé à l'extérieur. Les conditions climatiques doivent être mesurées et consignées dans le rapport d'essai.

C.5.2 Niveau de sévérité et expositions d'essai

Il est important de réaliser certaines expositions d'essai en dessous du niveau de protection en tension des dispositifs de protection contre les surtensions et également à un niveau de tension suffisamment faible pour éviter la formation d'un arc à l'intérieur du système, dans la mesure où des dommages peuvent apparaître. Ainsi, chaque niveau de sévérité doit comprendre trois amplitudes d'essai réelles, en commençant deux niveaux en dessous du niveau de sévérité spécifié, que l'on considère comme étant inférieur au niveau de protection de tension assuré par les dispositifs de protection contre les surtensions, et en dessous du seuil d'arc. Chaque impulsion d'essai doit utiliser la même forme d'onde que celle du niveau de sévérité spécifié.

Pour les essais d'immunité aux perturbations rayonnées, un niveau de sévérité doit être spécifié. Au moins deux expositions d'essai doivent être réalisées à chacune des trois amplitudes d'essai pour chaque orientation (Article B.4) et à chaque mode principal de fonctionnement de l'appareil en essai. Si une installation d'essai avec capacité d'hyper-rotation (voir [6]) pour l'appareil en essai existe, elle peut être utilisée pour les essais IEM-HA.

If the EUT does not pass the test requirements and if diagnostic measurements were made within the system or equipment, these probes and cables shall be removed, and the test shall be performed again to ensure that the added instrumentation is not the cause of the test failure. The test report shall clearly identify the presence of all external cables connected to the EUT, whether they are part of the equipment or are part of a measurement system.

The EUT shall be tested in each major operational mode that is specified in the test plan. For conducted immunity tests, both positive and negative waveforms shall be used. For radiated immunity tests, only one polarity of the waveform is required.

Laboratory tests shall be conducted with the ambient environmental conditions identified in C.5.1. On-site tests are not suitable for immunity acceptance tests, but these tests may be used to verify installed equipment immunity as well as system immunity. For on-site tests, ambient conditions described in C.5.1 below are desirable, but not required.

C.5.1 Climatic conditions

The required HEMP testing shall be carried out in standard climatic conditions in accordance with IEC 60068-1:

- temperature 15 °C to 35 °C
- relative humidity 25 % to 75 %
- atmospheric pressure 86 kPa to 106 kPa

Other ranges of climatic conditions shall also be considered if the equipment is designed and/or specified to operate for those conditions, or if the test is to be performed outdoors. The climatic conditions shall be measured and reported in the test report.

C.5.2 Severity level and test exposures

It is important to perform some test exposures below the voltage protection level of surge protective devices (SPDs) and also at a voltage level low enough to avoid arcing within the system, since damage may occur. Thus, each severity level shall consist of three actual test amplitudes, starting two levels below the specified severity level, which is assumed to be below the voltage protection level provided by SPDs and the arcing threshold. Each test pulse shall use the same waveform as that of the specified severity level.

For radiated immunity tests, a severity level shall be specified. At least two test exposures shall be performed at each of the three test amplitudes for each orientation (Clause B.4) and major operational mode of the EUT. If a test facility is available that includes the capability of hyper-rotation (see [6]) for the EUT, the facility may be used for HEMP testing.

C.5.3 Procédure d'essai

C.5.3.1 Mesures des paramètres d'essai

Les paramètres climatiques définis en C.5.1 doivent être mesurés par l'opérateur d'essai et documentés. Les caractéristiques de l'installation d'essai avec une série de mesures des formes d'ondes du champ électromagnétique, à l'intérieur du volume d'essai sans que l'appareil en essai soit présent, doivent être mises à la disposition de l'opérateur d'essai. Cette information doit également inclure une évaluation qui indique que les exigences pour l'uniformité de champ et les caractéristiques de forme d'onde indiquées en C.2.1 et C.2.2 sont satisfaites. Une mesure de champ électrique de référence doit être consignée pour chaque impulsion d'illumination de champ.

C.5.3.2 Procédure d'essai pour les perturbations rayonnées

Une petite installation d'essai aux perturbations rayonnées peut être utilisée pour essayer les matériels; cependant, les essais d'immunité aux perturbations conduites sur tous les accès par les câbles sont également exigés. Un système de petite taille peut être essayé dans un simulateur IEM-HA de grande taille et éventuellement satisfaire aux exigences d'immunité aux perturbations conduites pour de nombreux accès par les câbles. Cependant, des lignes de grande longueur, telles que les lignes de puissance en courant alternatif et les lignes de télécommunication, ne peuvent pas être essayées de manière appropriée dans n'importe quel simulateur IEM-HA. En conséquence, les essais d'immunité aux perturbations conduites sont toujours exigés pour ces accès.

Il est reconnu que le simulateur IEM-HA de grande taille est mieux adapté pour réaliser les essais au niveau système lorsque des pièces multiples de matériel peuvent fonctionner ensemble. Cependant, rien dans la présente norme internationale n'exige la réalisation des essais au niveau système dans un tel simulateur.

Chaque essai d'immunité à un niveau de sévérité spécifié comprend des expositions à trois niveaux: le niveau de sévérité spécifié et les deux niveaux immédiatement inférieurs. Si un seul niveau inférieur est défini par la présente norme internationale, alors seul un niveau doit être utilisé. Si le niveau de sévérité le plus bas est spécifié, alors seul ce niveau d'exposition est nécessaire pour l'essai d'immunité. Un minimum de deux impulsions du champ d'illumination doivent être réalisées pour chaque niveau d'exposition.

C.5.3.3 Installation d'essai de petite taille pour l'essai aux perturbations rayonnées

L'approche de base utilisée dans la présente procédure consiste à essayer les matériels et les systèmes de petite taille dans une installation d'essai de laboratoire, par exemple un guide d'onde TEM. L'appareil en essai doit être placé sur un support diélectrique à une hauteur de $0,1 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$ au-dessus du plan de sol à l'intérieur du volume d'essai et tous les câbles du matériel doivent être utilisés d'une manière cohérente avec le fonctionnement normal du matériel. Une connexion de terre doit être réalisée entre le plan de sol et l'appareil en essai conformément aux spécifications du fabricant. Il est nécessaire de contrôler et de documenter les longueurs et les positions des câbles associés à l'appareil en essai. Orienter le câblage pour un couplage minimal aux composantes de champ électrique et magnétique dans l'installation d'essai. Des essais complémentaires d'immunité aux perturbations conduites doivent être réalisés séparément pour tenir compte du couplage avec ces câbles.

L'appareil en essai doit être soumis à des rotations de façon à exposer tous les côtés (normalement six côtés) aux champs d'impulsion incidents, bien que des considérations pratiques puissent limiter le nombre de rotations. De plus, les deux polarisations doivent être appliquées.

C.5.3 Test procedure

C.5.3.1 Test parameter measurements

The climate parameters defined in C.5.1 shall be measured by the test operator and documented. The characteristics of the test facility consisting of a series of measurements of the electromagnetic field waveforms within the test volume without the EUT present shall be made available to the test operator. This information shall also include an evaluation that indicates that the requirements for the field uniformity and waveform characteristics stated in C.2.1 and C.2.2 have been met. A reference electric field measurement shall be recorded for each pulse of field illumination.

C.5.3.2 Radiated test procedure

A small radiated test facility can be used to test equipment; however, conducted immunity tests on all cable ports are also required. A small system may be tested in a large HEMP simulator and possibly meet the conducted immunity requirements for many cable ports. However, long lines such as a.c. power and telecommunication lines cannot be adequately tested in any HEMP simulator. Consequently, conducted immunity tests are always required for these ports.

It is recognized that the large HEMP simulator is better suited for performing system-level tests where multiple pieces of equipment may be operating together. However, it is not a requirement of this International Standard that system level testing be performed in such a simulator.

Each immunity test at a specified severity level consists of exposures at three exposure levels: the specified severity level and the next two lower levels. If only one lower level is defined by this International Standard, then only one level shall be used. If the lowest severity level is specified, then only that level of exposure is necessary for the immunity test. A minimum of two pulses of the field illumination shall be performed for each exposure level.

C.5.3.3 Small radiated test facility

The basic approach used in this procedure is to test equipment and small systems in a laboratory test facility, such as a TEM waveguide. The EUT shall be placed on a dielectric stand at a height of $0,1\text{ m} \pm 0,01\text{ m}$ above the ground plane within the test volume, and all equipment cables shall be used in manner consistent with the normal operation of the equipment. A ground connection shall be made between the ground plane and the EUT, according to the manufacturer's specifications. It is necessary to control and document the lengths and positions of the cables associated with the EUT. Orientate the cabling for minimum coupling to the electric and magnetic field components in the test facility. Additional conducted immunity tests shall be performed separately to account for the coupling to these cables.

The EUT shall be rotated to expose all sides (typically six sides) to the incident pulsed fields, although practical considerations may limit the number of rotations. In addition, both polarizations shall be applied.

Si la méthode de contrôle implique des mesures à l'intérieur de l'appareil en essai, les sondes et les câbles concernés doivent être positionnés avec soin de manière à minimiser les effets défavorables sur les mesures. En particulier, les câbles à fibres optiques sans matériaux métalliques sont recommandés pour de telles mesures.

C.5.4 Exécution de l'essai

L'essai doit être réalisé conformément au plan d'essai. Les expositions d'essai doivent être appliquées lorsque l'appareil en essai est dans chacun de ces modes principaux de fonctionnement dans les conditions normales de fonctionnement, comme défini dans le plan d'essai. Pour chaque niveau d'exposition d'essai, les impulsions doivent être appliquées avec un temps suffisant entre elles pour vérifier la dégradation ou les dommages du système. Après chaque niveau d'exposition, les caractéristiques de fonctionnement de l'appareil en essai doivent être déterminées.

C.5.5 Exécution de l'essai d'immunité aux perturbations rayonnées

L'essai d'immunité aux perturbations rayonnées doit être réalisé sur la base d'un plan d'essai, y compris la vérification des performances de l'appareil en essai, comme défini dans la norme de produit ou, en son absence, par la spécification technique.

L'appareil en essai doit être dans les conditions de fonctionnement normales. Une matrice de configuration d'essai comprenant les configurations de fonctionnement de l'appareil en essai, les états principaux de fonctionnement et les orientations par rapport à la direction de propagation de l'onde doit être développée. Pour chaque configuration d'essai, le plan d'essai doit spécifier:

- les niveaux d'exposition d'essai: le niveau de sévérité choisi et les deux niveaux immédiatement inférieurs;
- le nombre d'expositions à chaque niveau (au moins deux sont exigées);
- les points d'entrée ou les accès à évaluer;
- la description des positions des câbles et les mesures à effectuer;
- le matériel auxiliaire exigé;
- la polarité et l'angle d'incidence des champs simulés;
- les détails du montage d'essai, lorsqu'il est différent de celui spécifié à l'Article C.4 du présent document;
- les critères d'acceptation et de refus.

If the method of monitoring involves measurements within the EUT, the probes and cables involved shall be carefully positioned, so as to minimize adverse effects on the measurements. In particular, fibre optic cables without metal material are recommended for such measurements.

C.5.4 Test execution

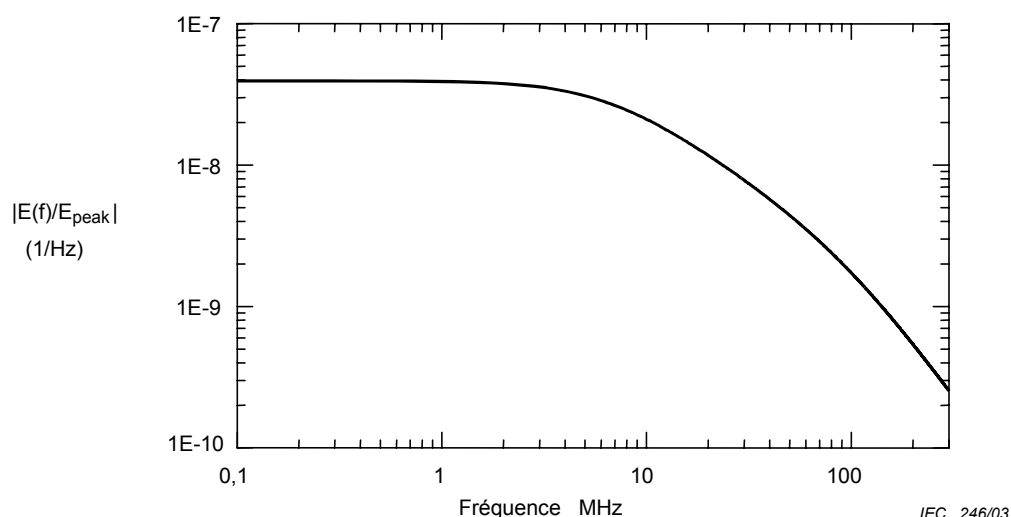
The test shall be performed in accordance with a test plan. Test exposures shall be applied when the EUT is in each of its major operating modes under normal operating condition, as defined in the test plan. For each test exposure level, the pulses shall be applied with sufficient time between pulses to check for system degradation or damage. After each exposure level, the operational performance of the EUT shall be determined.

C.5.5 Execution of the radiated immunity test

The radiated immunity test shall be carried out on the basis of a test plan, including the verification of the performances of the EUT, as defined in the product standard, or in its absence, by the technical specification.

The EUT shall be in the normal operating condition. A test configuration matrix consisting of the EUT operational configurations, major functional states, and orientations relative to the direction of wave propagation shall be developed. For each test configuration, the test plan shall specify

- test exposure levels: the selected severity level, plus the next two lower levels;
- the number of exposures at each level (at least two are required);
- the points of entry (PoEs) or ports to be evaluated;
- a description of positions of the cables and measurements to be made;
- the required auxiliary equipment;
- the polarity and angle of incidence of the simulated fields;
- the details of the test set-up, whenever it is different from that specified in Clause C.4 of this document;
- the pass/fail criteria.



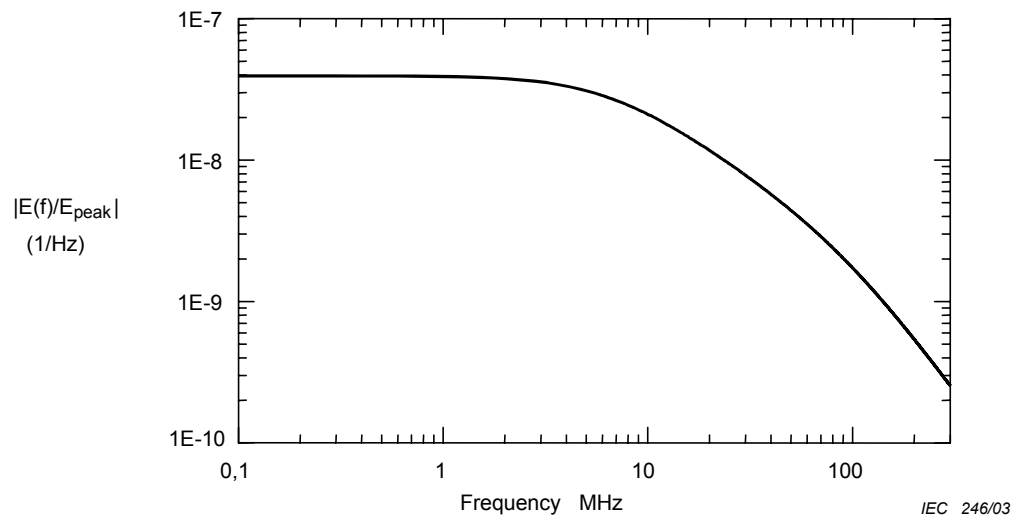
L'amplitude spectrale est déterminée en utilisant les paramètres donnés après l'Equation (C.1) dans l'Equation (C.2)

Figure C.1 – Amplitude spectrale dans le domaine fréquentiel entre 100 kHz et 300 MHz

Tableau C.1 – Niveaux d'essai d'immunité aux perturbations rayonnées définis dans la présente norme

Niveau d'essai	Essai exigé pour les matériels et les systèmes avec la protection suivante ^a	Valeur de champ crête E_{peak} ^b kV/m
R1	Concept 4	0,5
R2	Valeur intermédiaire	1
R3	Valeur intermédiaire	2
R4	Concepts 2A, 2B, 3	5
R5	Valeur intermédiaire	10
R6	Valeur intermédiaire	20
R7	Concepts 1A, 1B	50
RX	Applications spéciales	X

^a Les concepts de protection sont décrits dans la CEI 61000-5-3.
^b Selon la CEI 61000-2-11, Tableau 2.



Spectral magnitude is determined using parameters given after Equation (C.1) in Equation (C.2).

Figure C.1 – Frequency domain spectral magnitude between 100 kHz and 300 MHz

Table C.1 – Radiated immunity test levels defined in the present standard

Test level	Test required for equipment and systems with the following protection ^a	E-field peak value E_{peak}^b kV/m
R1	Concept 4	0,5
R2	Intermediate value	1
R3	Intermediate value	2
R4	Concepts 2A, 2B, 3	5
R5	Intermediate value	10
R6	Intermediate value	20
R7	Concepts 1A, 1B	50
RX	Special applications	X

^a The protection concepts are described in IEC 61000-5-3 .

^b According to IEC 61000-2-11, Table 2.

Annexe D (informative)

Caractérisation des guides d'onde TEM

D.1 Introduction

Cette annexe décrit les caractéristiques fondamentales d'une onde TEM, y compris les aspects de propagation et de polarisation. Les différentes catégories de guides d'onde TEM sont également présentées, avec les limites concernant les volumes d'essai et les fréquences de fonctionnement.

D.2 Distinction entre impédance d'onde et impédance caractéristique

Un guide d'onde TEM peut être considéré comme un genre particulier de ligne de transmission coaxiale, car tous les guides d'onde TEM se comportent comme une ligne de transmission. Les impédances d'onde et les impédances caractéristiques d'une ligne de transmission sans pertes sont définies comme suit en [33].

L'impédance d'onde η est définie comme le rapport des composantes de champ transverse, qui peut être calculée, en supposant qu'elle dépende de $e^{-j\beta z}$, pour donner

$$\eta = \frac{E_\rho}{H_\phi} = \frac{\omega \mu}{\beta} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{D.1})$$

où

η est l'impédance d'onde;

E_ρ est la composante transverse du champ électrique;

H_ϕ est la composante transverse du champ magnétique;

μ est la perméabilité du diélectrique de câble (la plupart du temps, air);

ε est la permittivité du diélectrique de câble (la plupart du temps, air);

β est la constante de propagation (partie réelle);

ω est la fréquence rayonnante.

Cette impédance d'onde est ensuite vue comme étant identique à l'impédance intrinsèque du milieu et elle constitue un résultat général pour les lignes TEM.

L'impédance caractéristique d'une ligne coaxiale circulaire-cylindrique est définie comme

$$Z_c = \frac{V_0}{I_0} = \frac{E_\rho \ln \frac{2h}{a}}{2\pi H_\phi} = \eta \cdot \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} \quad (\text{D.2})$$

où

Z_c est l'impédance caractéristique de la ligne coaxiale;

V_0 est la tension de la ligne coaxiale;

I_0 est le courant de la ligne coaxiale;

E_ρ est la composante transverse du champ électrique;

H_ϕ est la composante transverse du champ magnétique;

h $2h = r_i, r_i$: rayon du conducteur intérieur;

a $a = r_a, r_a$: rayon du conducteur extérieur.

Annex D (informative)

TEM waveguide characterization

D.1 Introduction

This annex describes the basic characteristics of a TEM wave, including the propagation and polarization aspects. The different categories of TEM waveguides are also presented, along with the limitations with respect to test volumes and frequencies of operation.

D.2 Distinction between wave and characteristic impedance

A TEM waveguide can be considered as a special kind of coaxial transmission line, because every TEM waveguide acts as a transmission line. The wave and characteristic impedances of a loss-less transmission line are defined as follows in [33].

The wave impedance η is defined as the ratio of the transverse field components, which can be calculated assuming an $e^{-j\beta z}$ -dependence to give

$$\eta = \frac{E_\rho}{H_\phi} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{D.1})$$

where

- η is the wave impedance;
- E_ρ is the transverse component of the electric field;
- H_ϕ is the transverse component of the magnetic field;
- μ is the permeability of cable dielectric (mostly air);
- ε is the permittivity of cable dielectric (mostly air);
- β is the propagation constant (real part);
- ω is the radiant frequency.

This wave impedance is then seen to be identical to the intrinsic impedance of the medium and is a general result for TEM transmission lines.

The characteristic impedance of a circular-cylindrical coaxial line is defined as

$$Z_c = \frac{V_0}{I_0} = \frac{E_\rho \ln \frac{2h}{a}}{2\pi H_\phi} = \eta \cdot \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} \quad (\text{D.2})$$

where

- Z_c is the characteristic impedance of the coaxial line;
- V_0 is the voltage of the coaxial line;
- I_0 is the current of the coaxial line;
- E_ρ is the transverse component of the electric field;
- H_ϕ is the transverse component of the magnetic field;
- h $2h = r_i$, r_i : radius of inner conductor;
- a $a = r_a$, r_a : radius of outer conductor.

où les formes pour E_ρ et H_ϕ de [7] ont été utilisées. L'impédance caractéristique dépend de la géométrie et elle sera différente pour d'autres configurations de ligne de transmission.

Les Equations (D.1) et (D.2) montrent qu'en général les impédances d'onde et caractéristique ne sont pas égales. Dans la mesure où les cellules TEM et les cellules «Gigahertz-TEM», ainsi que les lignes ouvertes à deux et trois plaques sont à la base des lignes de transmission TEM à deux conducteurs, en général les impédances d'onde et caractéristiques dans ces dispositifs ne seront pas égales non plus.

D.3 Onde TEM

Les ondes TEM sont plus facilement décrites selon leur comportement en espace libre. Les deux paragraphes suivants présentent plusieurs équations et critères à la fois pour les cas en espace libre et en guide d'onde.

D.3.1 Espace libre / mode TEM

En mode TEM, à la fois les vecteurs de champs électriques et magnétiques sont entièrement transverses par rapport à la direction de propagation de l'énergie (vecteur de Poynting $\vec{S}$). Il n'y a pas de composante ni de $\vec{E}$ ni de $\vec{H}$ dans la direction de transmission.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{D.3})$$

Pour «l'espace libre» le rapport entre $|\vec{E}|$ et $|\vec{H}|$ est donné par

$$\eta_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \, \Omega \quad (\text{D.4})$$

Les propriétés essentielles du mode TEM sont:

- pas de composante de champ dans la direction de transmission;
- le rapport entre $|\vec{E}|$ et $|\vec{H}|$ est approximativement de $120\pi \, \Omega$.

NOTE A une distance importante d'une antenne d'émission, la situation ci-dessus est observée. C'est la raison pour laquelle le mode TEM est souvent appelé «condition en champ lointain» d'une antenne.

D.3.2 Guide d'onde

Un guide d'onde classique pour applications RF ne se compose que d'une seule surface conductrice fermée. On peut montrer qu'un mode TEM ne peut pas se propager à l'intérieur d'un tel guide d'onde. Seuls les modes TE et/ou TM sont possibles. Les modes TE ou TM ayant une fréquence de coupure spécifique, la propagation d'onde n'est possible qu'au dessus de cette fréquence. Une section à connexion double ou multiple est nécessaire pour propager un mode TEM dans un guide d'onde (ligne de transmission multi-conducteurs, comme cellule TEM, ligne ouverte ou guide d'onde TEM ouvert). Chaque paire de conducteurs crée un système de propagation spécifique possible en mode TEM. Pour l'exemple représenté à la Figure D.2, la propagation de deux modes TEM séparés est possible. Chacun de ces modes TEM a les mêmes propriétés que le mode TEM en espace libre.

NOTE Chaque paire de conducteurs forme un système de transmission en mode TEM. A l'intérieur d'une ligne coaxiale, l'énergie du signal est transportée via le mode TEM.

where the forms for E_ρ and H_ϕ from [7] have been used. The characteristic impedance is geometry-dependent, and it will be different for other transmission line configurations.

Equations (D.1) and (D.2) show that in general the wave and characteristic impedances are not equal. Since TEM and gigahertz TEM cells and two- and three-plate striplines are basically two-conductor TEM-mode transmission lines, in general the wave and characteristic impedances in those devices will also not be equal.

D.3 TEM wave

TEM waves are most easily described in terms of their behaviour in free space. The following two subclauses present several equations and criteria for both the free-space and waveguide cases.

D.3.1 Free space/TEM mode

In a TEM mode both the electric and magnetic field vectors are entirely transverse to the direction of energy propagation (Poynting vector $\vec{S}$). There is no component of either $\vec{E}$ or $\vec{H}$ in the direction of transmission.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{D.3})$$

For "free space" the ratio between $|\vec{E}|$ and $|\vec{H}|$ is given by

$$\eta_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \, \Omega \quad (\text{D.4})$$

The essential properties of the TEM mode are

- no field component in the direction of transmission;
- the ratio between $|\vec{E}|$ and $|\vec{H}|$ is nearly $120\pi \, \Omega$.

NOTE Far away from a transmitting antenna, the situation above is observed. Therefore, the TEM mode is often called the "far-field condition" of an antenna.

D.3.2 Waveguide

A classical waveguide for RF applications consists of only one closed conducting surface. It can be shown that a TEM mode cannot propagate within such a waveguide. Only TE and/or TM modes are possible. Because TE or TM modes have a specific cut-off frequency, wave propagation is possible only above this frequency. A double- or multi-connected cross-section is necessary to propagate a TEM mode within a waveguide (multi-conductor transmission line, like TEM cell, stripline or open TEM waveguide). Each pair of two conductors creates a system for a possible specific TEM-mode propagation. For the example shown in Figure D.2, propagation of two separate TEM modes is possible. Each of these TEM modes has the same properties as the free-space TEM mode.

NOTE Each pair of conductors forms a TEM-mode transmission system. Inside a coaxial line the signal energy is transported via the TEM mode.

D.4 Propagation d'onde

La propagation d'onde décrit la forme des lignes équiphasées et des surfaces du champ.

D.4.1 Propagation sphérique

Ce type de propagation est le plus commun en champ distant en espace libre. Normalement, il est produit par une source ponctuelle telle qu'une antenne unique. L'amplitude du champ diminue avec l'augmentation de la distance à la source.

D.4.2 Propagation d'onde plane en espace libre

Très loin d'une antenne, le front d'onde peut être considéré comme plan. Ce type de propagation sera observé à l'intérieur d'un guide d'onde à plaques parallèles, dans lequel l'amplitude de champ est constante et indépendante de la distance par rapport à la source.

D.4.3 Vitesse de propagation

La vitesse de phase du mode TEM pour la propagation en espace libre et dans les guides d'onde TEM est toujours égale à la vitesse de la lumière c_0 . Elle ne dépend que de la permittivité ε et de la perméabilité μ de l'espace.

D.5 Polarisation

D.5.1 Vecteur polarisation

La direction du vecteur champ électrique représente le vecteur polarisation.

D.5.2 Polarisation linéaire et elliptique

En général, la direction du vecteur polarisation change dans le temps. La courbe tracée par l'extrémité du vecteur polarisation, représentée à la Figure D.3, définit le type de polarisation.

A partir de [7] la forme de la courbe de polarisation peut être calculée par la procédure suivante. Le vecteur champ électrique transverse est donné par:

$$\vec{E}_{tr}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \underline{V}_i \cdot \vec{e}_{tr_i} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (\text{D.5})$$

Le premier terme de la série représente le mode TEM, ainsi un vecteur de Fresnel complexe peut être écrit comme

$$\underline{\vec{A}}_{TEM} = \underline{V}_1 \cdot \vec{e}_{tr_1} = \underline{V}_{TEM} \cdot \vec{e}_{tr_{TEM}} \quad (\text{D.6})$$

Le vecteur de Fresnel peut être séparé en parties réelle et imaginaire,

$$\underline{\vec{A}}_{TEM} = \vec{a}_r + j\vec{a}_i \quad (\text{D.7})$$

D.4 Wave propagation

Wave propagation describes the shape of the equiphase lines and surfaces of the field.

D.4.1 Spherical propagation

This type of propagation is the most common one in free space far field. Normally it is caused by a point source like a single antenna. The field amplitude decreases with increasing distance to the source.

D.4.2 Plane wave propagation in free space

Very far away from an antenna, the wave front can be considered as planar. This kind of propagation will be observed within a parallel plate waveguide where the field amplitude is constant and independent of the distance to the source.

D.4.3 Velocity of propagation

The phase velocity of the TEM mode for propagation in free space and TEM waveguides is always equal to speed of light c_0 . It only depends on the permittivity ε and of the permeability μ of the space.

D.5 Polarization

D.5.1 Polarization vector

The electric field vector direction represents the polarization vector.

D.5.2 Linear and elliptic polarization

In general the direction of the polarization vector changes with time. The curve traced out by the tip of the polarization vector, shown in Figure D.3, defines the type of polarization.

From [7] the shape of the polarization curve can be calculated by the following procedure. The transverse electric field vector is given by

$$\vec{E}_{tr}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \underline{V}_i \cdot \vec{e}_{tr_i} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (\text{D.5})$$

The first term of the series represents the TEM mode, so a complex phasor can be written as

$$\vec{A}_{TEM} = \underline{V}_1 \cdot \vec{e}_{tr_1} = \underline{V}_{TEM} \cdot \vec{e}_{tr_{TEM}} \quad (\text{D.6})$$

The phasor can be separated into its real and imaginary parts

$$\vec{A}_{TEM} = \vec{a}_r + j\vec{a}_i \quad (\text{D.7})$$

Les vecteurs $\vec{a}_r$ et $\vec{a}_i$ définissent un plan fixe. En général l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ se déplace sur une ellipse. Si $\vec{a}_r$ et $\vec{a}_i$ sont parallèles, $\vec{E}$ se déplace sur une ligne fixe. Ce cas est appelé *polarisé linéairement*. Tous les modes individuels sont fondamentalement polarisés linéairement. Seule la superposition avec d'autres modes donne lieu à une polarisation circulaire. Le mode TEM intentionnel pour les essais dans les guides d'onde TEM est généralement polarisé linéairement.

D.6 Types de guides d'onde TEM

La version la plus simple de guide d'onde TEM est une ligne de transmission à deux conducteurs comme représentée à la Figure D.5.

La ligne de transmission complète peut être divisée en trois sections.

1. Section alimentation

Il s'agit de l'accès auquel un générateur ou un récepteur de signal est connecté au guide d'onde TEM

2. Section guide d'onde TEM

Contient généralement le volume d'essai.

3. Section terminaison

Normalement, la terminaison représente une résistance réelle ou équivalente qui est égale à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission (= guide d'onde TEM)

Pour la plupart des guides d'onde TEM à deux accès, les sections alimentation et terminaison sont géométriquement identiques et donc interchangeables. Un connecteur coaxial est utilisé aux deux accès. Certains guides d'onde TEM sont basés sur un système de ligne de transmission symétrique, auquel cas un transformateur SYMÉTRISEUR est nécessaire.

Tout d'abord, les guides d'onde TEM peuvent être classés en géométries *fermées* et *ouvertes*. Une géométrie est dite «*fermée*» lorsqu'un conducteur entoure complètement l'autre conducteur. Dans ces cas, le conducteur extérieur agit également comme un écran électromagnétique.

Ensuite, il existe des guides d'onde à *un accès* et à *deux accès*. Cette classification définit la terminaison d'un guide d'onde TEM. Normalement, le guide d'onde TEM est utilisé dans des conditions de terminaison adaptée. La manière la plus simple d'adapter un guide d'onde TEM à deux accès consiste à placer une terminaison à constantes localisées égale à l'impédance caractéristique à un accès. Dans ce cas, on suppose que la géométrie de la ligne TEM à proximité des accès (section à transition progressive) est bien conçue pour l'adaptation à large bande (voir la Figure D.4).

Pour un guide d'onde TEM à un accès, la terminaison est réalisée avec des résistances réparties et/ou une combinaison d'absorbants anéchoïques. Ce type de terminaison peut être utilisé jusqu'à plusieurs GHz dans certaines géométries. Plutôt qu'une plage large de fréquences, un guide d'onde TEM à deux accès a l'avantage de permettre des mesures de puissances réfléchies et transmises à quelque accès que ce soit.

Les septums peuvent être soit un fil unique soit des fils multiples connectés en parallèle, ou une plaque unique ou des plaques multiples connectées en parallèle. Pour les systèmes à conducteurs multiples, l'amplitude et la phase d'excitation peuvent être modifiées volontairement pour faire varier la polarisation dominante à l'intérieur du volume d'essai.

The vectors $\vec{a}_r$ and $\vec{a}_i$ define a fixed plane. In general the tip of vector $\vec{E}$ moves in an ellipse. If $\vec{a}_r$ and $\vec{a}_i$ are parallel, $\vec{E}$ moves on a fixed line. This case is called linearly polarized. Any individual modes are inherently linearly polarized. Only superposition with other modes results in circular polarization. The intentional TEM mode for testing purposes in TEM waveguides is usually linearly polarized.

D.6 Types of TEM waveguides

The simplest version of a TEM waveguide is a two-conductor transmission line as shown in Figure D.5.

The complete transmission line may be divided into three sections.

1. Feed section

This is the port where a signal generator or receiver is connected to the TEM-waveguide

2. TEM-waveguide section

Usually contains the test volume.

3. Termination section

Normally the termination represents an actual or equivalent resistor which is equal to the characteristic impedance of the transmission line (= TEM waveguide)

For most two-port TEM waveguides, the feed and termination sections are geometrically identical and therefore interchangeable. A coaxial connector is used at both ports. Some TEM waveguides are based on a balanced transmission-line system, in which case a BALUN transformer is needed.

Firstly, TEM waveguides can be classified into closed and open geometries. A geometry is called "closed" when one conductor fully surrounds the other conductor. In these cases, the outer conductor also acts as an electromagnetic shield.

Secondly, there are one-port and two-port waveguides. This classification defines the termination of a TEM waveguide. Normally the TEM waveguide is used under matched termination conditions. The simplest way to match a two-port TEM waveguide is to put a lumped termination equal to the characteristic impedance at one port. In this case, it is assumed that the TEM line geometry close to the ports (tapered section) is well designed for wide-band matching (see Figure D.4).

For a one-port TEM waveguide, the termination is made with distributed resistors and/or a combination of anechoic absorbers. This type of termination can be used up to several GHz in some geometries. Rather than a wide frequency range, a two-port TEM waveguide has the advantage of allowing measurements of reflected and transmitted powers at either port.

Septums can either be single or multiple wires connected in parallel or single or multiple plates connected in parallel. For multiple conductor systems, the excitation amplitude and phase can be intentionally changed to vary the dominant polarization within the test volume.

Le septum peut être installé de manière symétrique ou asymétrique par rapport au conducteur extérieur. L'avantage d'un guide d'onde TEM asymétrique est un volume d'essai plus important.

D.6.1 Guides d'onde TEM ouverts

Un guide d'onde TEM ouvert simple peut être construit en utilisant une plaque installée sur un plan de sol conducteur. Un générateur ou un récepteur (impédance typique de $50\ \Omega$) est connecté à un accès, et l'autre accès est adapté à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission. Une distribution tension/courant constante le long de la structure est obtenue avec une adaptation d'impédance correcte. Cette géométrie est appelée guide d'onde TEM ouvert à deux accès.

Le principal inconvénient des guides d'onde ouverts est l'énergie perdue par rapport au rayonnement. Ce rayonnement non désiré peut causer des perturbations sur le système du matériel en essai. Pour les essais d'immunité à onde continue en particulier, une pièce écrantée est absolument nécessaire pour le guide d'onde ouvert.

D.6.2 Guides d'onde TEM fermés (cellules TEM)

Le principal avantage des configurations de guides d'onde TEM fermés est le blindage inhérent. Tous les essais d'immunité peuvent être réalisés sans générer de perturbation sur l'environnement. Autre avantage, la cellule est un système asymétrique de telle manière qu'il n'y a pas besoin de SYMÉTRISEUR. Enfin, en général, un guide d'onde TEM n'a pas de limite en basse fréquence. Pour cette raison, les essais aux transitoires peuvent être réalisés avec des guides d'onde TEM fermés.

NOTE Pour un guide d'onde TEM d'alimentation symétrique, une limitation en basse fréquence peut être introduite par le SYMÉTRISEUR.

D.7 Limitations de fréquences

Le fonctionnement d'un guide d'onde TEM est prévu à partir de l'hypothèse selon laquelle, le mode TEM a une structure de champ identique à une onde plane en espace libre, sur une portion définie de la section de la cellule. C'est pourquoi l'utilisation d'un guide d'onde TEM pour la mesure d'émission ou d'immunité, exige la propagation du mode TEM sur la gamme de fréquences utilisable.

Pour une fréquence donnée à l'intérieur de la plage de fonctionnement du guide d'onde vide, l'onde aura une section transversale de dimension qui permettra à des modes de propagation autres que le TEM de s'établir. Pour un mode non-TEM donné, le point le long de la longueur du guide d'onde pour lequel le mode peut se propager dépend de la fréquence et revient vers le point d'alimentation quand la fréquence croît. Le mode non-TEM d'ordre le plus faible (normalement TE_{10}) peut se propager lorsqu'une dimension de la section transversale du guide d'onde, dépasse la moitié de la longueur d'onde en espace libre à cette fréquence. Les modes d'ordre plus élevé sont lancés initialement par la conversion de mode à partir du mode TEM. La conversion d'énergie entre deux modes est provoquée par des irrégularités dans la structure du guide d'onde qui peuvent se coupler aux deux modes.

En pratique, beaucoup de guides d'onde TEM ouverts et fermés incluent un certain type d'absorbants anéchoïques en ferrite ou en mousse pour réduire ou enlever les modes d'ordre supérieur et les distributions de champs résonants qui ne se propagent pas. Dans le cas d'une installation dans des locaux adaptés en terme de distribution de champ modal, les caractéristiques du mode TEM peuvent être pour l'essentiel préservées. Généralement, avec la combinaison correcte de la charge en absorbants et de la transition des conducteurs d'entrée/sortie, de nombreux guides d'onde TEM fonctionneront en mode TEM jusqu'à des fréquences de plusieurs GHz ou plus. Le placement correct d'absorbants est déterminé par les formes des sections d'entrée/sortie et celle du volume d'essai. L'inconvénient pour

The septum can be installed either symmetrically or asymmetrically with respect to the outer conductor. The advantage of an asymmetrical TEM waveguide is a larger test volume.

D.6.1 Open TEM waveguides (striplines, etc.)

A simple open TEM waveguide can be built using a plate installed over a conducting ground plane. A generator or receiver (typical impedance $50\ \Omega$) is connected at one port, and the other port is matched to the transmission line characteristic impedance. A constant voltage/current distribution along the structure is achieved with proper impedance matching. This geometry is called an open two-port TEM waveguide.

The main disadvantage of open waveguides is energy lost to radiation. This unwanted radiation can cause interference to the test equipment system. Particularly for continuous-wave immunity testing, a shielded room for the open waveguide is absolutely necessary.

D.6.2 Closed TEM waveguides (TEM cells)

The main advantage of the closed TEM waveguide configurations is the inherent shielding. All immunity tests can be performed without generating any disturbance to the environment. Another advantage is that the cell is an unbalanced system, so a BALUN is not needed. Lastly, in general a TEM waveguide has no low-frequency limit. For that reason, transient tests can be performed with closed TEM waveguides.

NOTE For a symmetrical-feed TEM waveguide, a low-frequency limitation may be introduced by the BALUN.

D.7 Frequency limitations

The operation of a TEM waveguide is predicated on the assumption that the TEM mode has an identical field structure to that of a plane wave in free space over a defined portion of the cross-section of the cell. Therefore, using a TEM waveguide in emission or immunity measurement requires the propagation of the TEM mode over the useable frequency range.

For a given frequency within the operating range of the empty waveguide, the wave will encounter a cross-section of dimension that will allow propagating modes other than TEM to be established. For a given non-TEM mode, the point along the waveguide's length at which the mode can propagate is dependent on frequency, and moves back towards the feed point with increasing frequency. The lowest order non-TEM mode (typically TE_{10}) is able to propagate when one cross-sectional dimension of the waveguide exceeds one-half of the free-space wavelength at that frequency. Higher order modes are launched initially by mode conversion from the TEM mode. Energy conversion between two modes is caused by irregularities in the waveguide structure that can couple to both modes.

In practice, many open and closed TEM waveguides include some type of foam or ferrite anechoic absorbers to minimize or remove the higher order modes and non-propagating resonant field distributions. If installed in the proper locations with respect to the modal field distribution, TEM mode characteristics can be essentially preserved. Generally, with the proper combination of absorber loading and input/output conductor tapering, many TEM waveguides will operate in a TEM mode up to frequencies of several GHz or higher. Proper absorber placement is determined by the shapes of the input/output tapers and the test-volume section. The disadvantage for many TEM waveguides with absorber-lining in the test-

beaucoup de guides d'onde TEM avec revêtement par absorbants dans la section du volume d'essai, est que le facteur de champ e_{oy} (voir A.3.2.2) utilisé dans l'algorithme de corrélation d'émission, ne peut plus être calculé de manière analytique. Ceci peut conduire à des incertitudes de mesure plus élevées.

Pour tout guide d'onde TEM avec ou sans absorbant, la gamme de fréquences valide doit être établie en utilisant les méthodes décrites dans la présente norme (voir 5.1.1 et 5.2.2).

Plus d'informations sur l'homogénéité de champ et la fréquence résonante sont données en [17] et [19]. Pour les guides d'onde TEM sans absorbant, les fréquences résonantes dépendent de la géométrie du guide d'onde TEM. Dans une cellule TEM à deux accès, elles interviennent entre une certaine section transversale de la section d'alimentation et de la section de terminaison, appelées positions de coupure z_c . Chaque mode d'ordre supérieur a une autre position de coupure, en fonction du type de mode. Entre accès et position de coupure, le mode de champ n'est pas en mesure de se propager. Une résonance intervient si la distance entre les positions de coupure est un multiple de la moitié de la longueur d'onde. Pour des raisons de symétrie, le champ résonant doit avoir un maximum ou être nul au milieu de la cellule à $z = z_{sym}$. Les fréquences résonantes des modes de champs peuvent être calculées analytiquement par

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{n+1}{2} \cdot \pi - \arctan\left(\frac{K_3}{K_4}\right)}{z_{sym}} \right)^2 + k_c^2(z_{sym})} \quad (D.8)$$

avec $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ et $K_3, K_4 = f(z, a, k, k_c, J_v)$ et $k_c = f(z_c, a, \text{mode})$.

Les constantes K_1 à K_4 peuvent être résolues de manière analytique. K_1 est choisi égale à 1. Par conséquent K_2 vaut 0. K_3 et K_4 peuvent être écrites selon:

$$\begin{pmatrix} K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \cos(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & -\sin(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) \\ -\frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \sin(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & \cos(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) \end{pmatrix} \quad (D.9)$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{a' z_k} \cdot J_\nu(k z_k) \\ \frac{a' - 2\nu a'}{2\sqrt{a' z_k}} \cdot J_\nu(k z_k) + \sqrt{a' z_k} \cdot J_{\nu-1}(k z_k) \end{pmatrix}$$

Pour les détails voir [19].

volume section is that the field factor e_{0y} (see A.3.2.2.2) used in the emissions correlation algorithm can no longer be calculated analytically. This may lead to higher measurement uncertainties.

For any TEM waveguide with or without absorber, the valid frequency range shall be established using the methods described in this standard (see 5.1.1 and 5.2.2).

Further information about field homogeneity and resonant frequency are given in [17] and [19]. For TEM waveguides without absorber, resonant frequencies depend on the geometry of the TEM waveguide. In a two-port TEM cell they occur between a certain cross-section of the feeding section and of the termination section, called cut-off positions z_c . Each higher order mode has another cut-off position, depending on the mode-type. In between port and cut-off position the field mode is not able to propagate. A resonance occurs if the distance between the two cut-off positions is a multiple of the half wavelength. For symmetrical reasons the resonant field shall have a maximum or be zero in the middle of the cell at $z = z_{sym}$. The resonant frequencies of the field modes can be analytically calculated by

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{n+1}{2} \cdot \pi - \arctan\left(\frac{K_3}{K_4}\right)}{z_{sym}} \right)^2 + K_c^2(z_{sym})} \quad (D.8)$$

with $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $K_3, K_4 = f(z, a, k, k_c, J_\nu)$ and $k_c = f(z_c, a, \text{mode})$.

The constants K_1 to K_4 may be solved analytically. K_1 is chosen to 1. Therefore K_2 leads to 0. K_3 and K_4 can be written as:

$$\begin{pmatrix} K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \cos(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & -\sin(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) \\ -\frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \sin(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & \cos(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) \end{pmatrix} \quad (D.9)$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{a' z_k} \cdot J_\nu(k z_k) \\ \frac{a' - 2\nu a'}{2\sqrt{a' z_k}} \cdot J_\nu(k z_k) + \sqrt{a' z_k} \cdot J_{\nu-1}(k z_k) \end{pmatrix}$$

For details see [19].

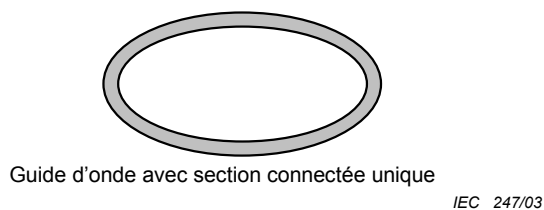


Figure D.1 – Guide d'onde le plus simple (pas d'onde TEM !)

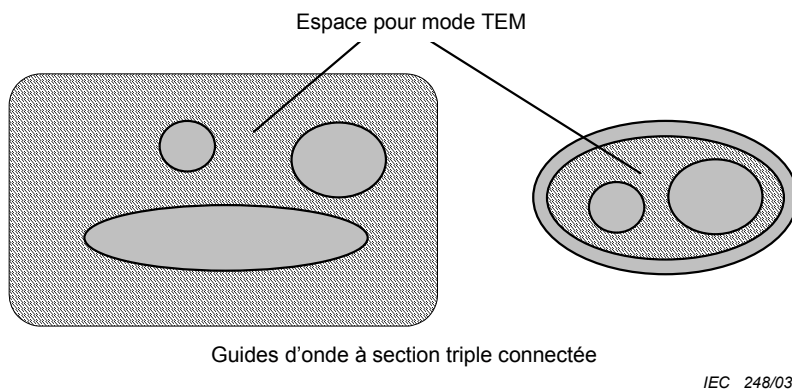


Figure D.2 – Guides d'onde pour propagation TEM

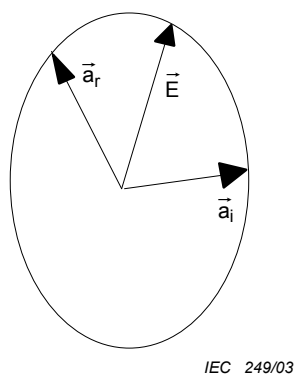


Figure D.3 – Vecteur polarisation

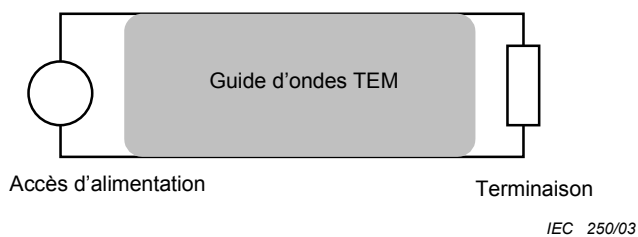


Figure D.4 – Modèle de ligne de transmission pour propagation TEM

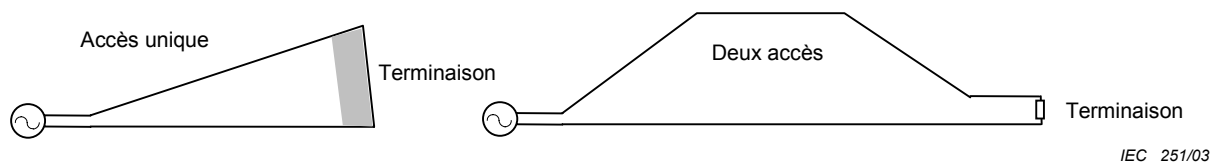


Figure D.5 – Guides d'onde TEM à un ou deux accès

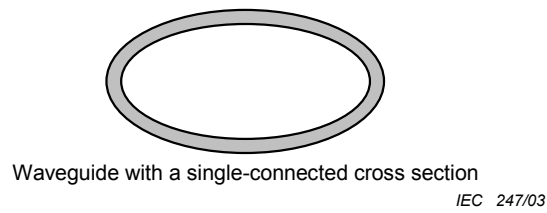


Figure D.1 – Simplest waveguide (no TEM wave!)

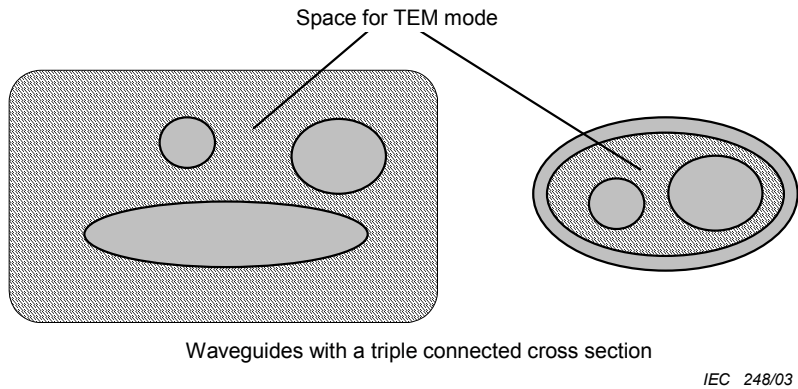


Figure D.2 – Waveguides for TEM propagation

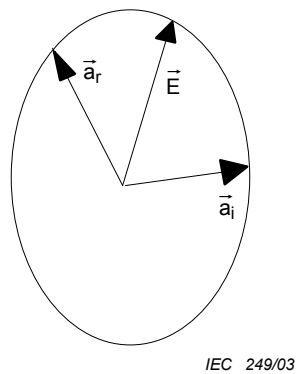


Figure D.3 – Polarization vector

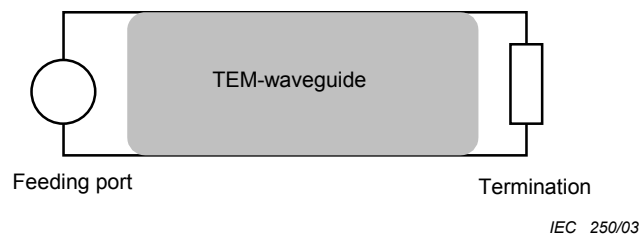


Figure D.4 – Transmission line model for TEM propagation

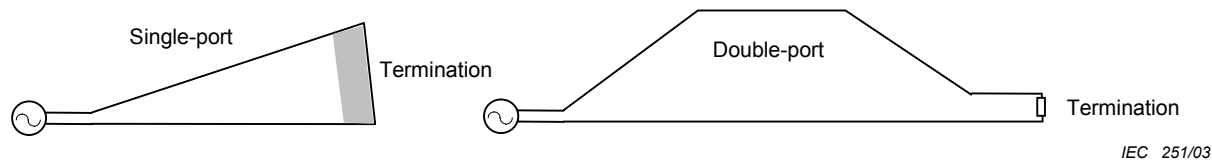


Figure D.5 – One- and two-port TEM waveguides

Annexe E (informative)

Normes contenant des guides d'onde TEM

ANSI C63.4, *Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*

ANSI C63.14-1998, *American National Standard Dictionary for Technology of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)*

CISPR 20, *Récepteurs de radiodiffusion et de télévision et équipements associés – Caractéristiques d'immunité – Limites et méthodes de mesure*

CISPR 22, *Appareils de traitement de l'information – Caractéristiques des perturbations radioélectriques – Limites et méthodes de mesure*

CISPR 25, *Caractéristiques des perturbations radioélectriques pour la protection des récepteurs utilisés à bord des véhicules, des bateaux et des engins – Limites et méthodes de mesure*

EIA/TIA-631, *Telecommunications Telephone Terminal Equipment – Radio Frequency Immunity Requirements for Equipment Having an Acoustic Output*

ETR 273-5, *Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Improvement of radiated methods of measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties; Part 5: Striplines*

CEI 60489-1, *Méthodes de mesure applicables au matériel de radiocommunication utilisé dans les services mobiles – Première partie: Définitions générales et conditions normales de mesure*

CEI 60489-3, *Méthodes de mesure applicables au matériel de radiocommunication utilisé dans les services mobiles – Troisième partie: Récepteurs conçus pour les émissions A3E ou F3E*

CEI 61967-2, *Circuits intégrés – Mesure des émissions électromagnétiques, 150 kHz à 1 GHz – Partie 2: Mesure des émissions rayonnées, Méthode par la cellule TEM²*

IEEE Std C95.1, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*

IEEE Std C95.3, *IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields – RF and microwave*

IEEE Std 1309-1996, *IEEE Standard for Calibration of electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*

IEEE Std 145-1993, *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*

IEEE Std 211-1997, *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation*

² A l'étude.

Annex E (informative)

Standards including TEM waveguides

ANSI C63.4, *Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*

ANSI C63.14-1998, *American National Standard Dictionary for Technology of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)*

CISPR 20, *Sound and television broadcast receivers and associated equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement*

CISPR 22, *Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*

CISPR 25, *Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles – Limits and methods of measurement*

EIA/TIA-631, *Telecommunications Telephone Terminal Equipment – Radio Frequency Immunity Requirements for Equipment Having an Acoustic Output*

ETR 273-5, *Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Improvement of radiated methods of measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties – Part 5: Striplines*

IEC 60489-1, *Methods of measurement for radio equipment used in the mobile services – Part 1: General definitions and standard conditions of measurement*

IEC 60489-3, *Methods of measurement for radio equipment used in the mobile services – Part 3: Receivers for A3E or F3E emissions*

IEC 61967-2, *Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 2: Measurement of radiated emission, TEM-cell method²*

IEEE Std C95.1, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*

IEEE Std C95.3, *IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields – RF and microwave*

IEEE Std 1309-1996, *IEEE Standard for Calibration of electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*

IEEE Std 145-1993, *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*

IEEE Std 211-1997, *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation*

² Under consideration.

ISO 11452, (toutes les parties) *Véhicules routiers – Méthodes d'essai d'un véhicule soumis à des perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique en bande étroite*

MIL-STD 461, *Electromagnetic Emission and Susceptibility, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference*

MIL-STD 462, *Electromagnetic Interference Characteristics, Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics*

ISO 11452, (all parts), *Road vehicles – Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy*

MIL-STD 461, *Electromagnetic Emission and Susceptibility, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference*

MIL-STD 462, *Electromagnetic Interference Characteristics, Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics*

.....

Bibliographie

- [1] M. Alexander, A. Nothofer, R.C. Dixon, «The use of ferrite clamps and clip-on ferrites», CISPR/A-TC77 (JTF-TEM-Alexander-Nothofer-Dixon) 01-01, Juin 2001
- [2] ANSI C63.4-2000, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Déc. 2000
- [3] T.M. Babij, «Evaluation of errors in the calibration of TEM cells», *IEEE Miami Technicon '87*, Miami, FL, pp. 199-201, 1987
- [4] A. Beggio, G. Borio, and R.E. Zich, «On the unwanted effects on the radiated emission and susceptibility measurements due to the introduction of a wooden table», *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japon, pp.252-255, Mai 1999
- [5] S. Bentz, «Use of the TEM cell for compliance testing of emission and immunity, an IEC perspective», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 43-47, 1996
- [6] H.S. Berger, and A. Tsaliovich, «Unlicensed PCS product EMC compliance measurement rational and alternatives», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 396-401, 1996
- [7] J. van Bladel, *Electromagnetic Fields*, Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [8] Ch. Braun, W. Graf, P. Guidi, H.U. Schmidt «Beeinflussung der Stromverteilung auf Test-objekten in TEM-Wellenleitern bei Variation des Füllfaktors», (traduction: «Influence de la distribution du courant sur les objets soumis aux essais dans les guides d'onde TEM, pour des tailles d'objet variables»), *Kleinheubach Symposium of URSI German NC and ITG*, Kleinheubacher Berichte, Deutsche Telekom, Darmstadt, Allemagne, vol. 39, 1996
- [9] E.L. Bronaugh, «Simplifying EMI immunity (susceptibility) tests in TEM cells», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, D.C., pp. 488-491, Août 1990
- [10] E. Bronaugh, and J. Osburn, «Radiated emissions test performance of the GHz TEM cell», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, NJ, pp. 1-7, Août 1991
- [11] CISPR 14 (toutes les parties) *Compatibilité électromagnétique – Exigences pour les appareils électrodomestiques, outillages électriques et appareils analogues*
- [12] CISPR 20: *Récepteurs de radiodiffusion et de télévision et équipements associés – Caractéristiques d'immunité – Limites et méthodes de mesure*
- [13] R.E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., *IEEE Press*, Piscataway, NJ, 1991
- [14] M. Crawford, and J. Workman, «Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Baltimore, MD, pp. 80-85, 1980
- [15] H. Garbe, H. Haase, M. Koch, «Specification of alternative test sites with respect to given EMC field standards», *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Suisse, pp. 459-464, Fév. 1997
- [16] J. Glimm, K. Münter, M. Spitzer, Th. Dötzer, Th. Schrader, «Influence of calibration and measurement techniques on the inhomogeneity of electromagnetic fields for immunity tests», *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japon, pp. 600-603, Mai 1999

Bibliography

- [1] M. Alexander, A. Nothofer, R.C. Dixon, "The use of ferrite clamps and clip-on ferrites," CISPR/A-TC77 (JTF-TEM-Alexander-Nothofer-Dixon) 01-01, June 2001
- [2] ANSI C63.4-2000, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Dec. 2000
- [3] T.M. Babij, "Evaluation of errors in the calibration of TEM cells," *IEEE Miami Technicon '87*, Miami, FL, pp. 199-201, 1987
- [4] A. Beggio, G. Borio, and R.E. Zich, "On the unwanted effects on the radiated emission and susceptibility measurements due to the introduction of a wooden table," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp.252-255, May 1999
- [5] S. Bentz, "Use of the TEM cell for compliance testing of emission and immunity, an IEC perspective," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 43-47, 1996
- [6] H.S. Berger, and A. Tsaliovich, "Unlicensed PCS product EMC compliance measurement rational and alternatives," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 396-401, 1996
- [7] J. van Bladel, *Electromagnetic Fields*, Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [8] Ch. Braun, W. Graf, P. Guidi, H.U. Schmidt "Beeinflussung der Stromverteilung auf Testobjekten in TEM-Wellenleitern bei Variation des Füllfaktors," (translation: "Influence of current distribution on test objects in TEM waveguides for variable object size"), *Kleinheubach Symposium of URSI German NC and ITG*, Kleinheubacher Berichte, Deutsche Telekom, Darmstadt, Germany, vol. 39, 1996
- [9] E.L. Bronaugh, "Simplifying EMI immunity (susceptibility) tests in TEM cells," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, D.C., pp. 488-491, August 1990
- [10] E. Bronaugh, and J. Osburn, "Radiated emissions test performance of the GHz TEM cell," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, NJ, pp. 1-7, Aug. 1991
- [11] CISPR 14 (all parts), *Electromagnetic compatibility – Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus*
- [12] CISPR 20, *Sound and television broadcast receivers and associated equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement*
- [13] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., *IEEE Press*, Piscataway, NJ, 1991
- [14] M. Crawford, and J. Workman, "Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Baltimore, MD, pp. 80-85, 1980
- [15] H. Garbe, H. Haase, M. Koch, "Specification of alternative test sites with respect to given EMC field standards," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 459-464, Feb. 1997
- [16] J. Glimm, K. Münter, M. Spitzer, Th. Dötzer, Th. Schrader, "Influence of calibration and measurement techniques on the inhomogeneity of electromagnetic fields for immunity tests," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp. 600-603, May 1999

- [17] C. Groh, J.P. Kaerst, M. Koch, and H. Garbe, «TEM Waveguides for EMC measurements», *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 440-445, Nov. 1999
- [18] C. Groh, J.P. Kaerst, and H. Garbe, «Einfluss der Beladung auf die Feldmoden in TEM Wellenleitern», (traduction: «Influence de la charge sur les modes de champ dans les guides d'onde TEM»), *Elektromagnetische Vertraeglichkeit EMV 2000 (8. Intl. Symp. and Exhb. on EMC)*, VDE Verlag, Berlin, Allemagne, pp. 287-294, Fév. 2000, ISBN 3-8007-2522-3
- [19] C. Groh, *TEM Zellen zur Kalibration von elektromagnetischen Feldsensoren*, (traduction: *Cellules TEM pour la calibration des sondes de champs électromagnétiques*), PhD-thesis, University of Hannover, Allemagne, (à publier)
- [20] T.E. Harrington, Z. Chen, and M.D. Foegelle, «GTEM radiated emissions testing and FDTD modeling», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, pp. 770-775, 1999
- [21] T.E. Harrington, «Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, pp. 23-28, 2000
- [22] T.E. Harrington, and E.L. Bronaugh, «EUT directivity and other uncertainty considerations for GHz-range use of TEM waveguides», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montréal, QC, Canada, pp. 117-122, 2001
- [23] CEI 61000-2-9 *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2: Environnement – Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations radiantes*. Publication fondamentale en CEM
- [24] IEEE Std 1309-1996: *IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996.,
- [25] J.P. Kaerst, C. Groh, and H. Garbe, «Field mode properties of loaded waveguides», *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Suisse, pp. 481-486, Fév. 2001
- [26] J.P. Kaerst, *Qualifikation beladener TEM Wellenleiter*, (traduction: *Validation des guides d'onde chargés*), PhD-thesis, University of Hannover, Allemagne, (à publier)
- [27] M. Klingler, J. Rioult, J.-P. Ghys, and S. Ficheux, «Wideband total radiated power measurements of electronic equipment in TEM and GTEM cells», *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Suisse, pp. 665-670, 1999
- [28] M. Koch, *Analytische Feldberechnung in TEM Zellen*, (traduction : *Calcul de champ analytique dans les cellules TEM*), PhD-thesis, University of Hannover, Shaker-Verlag, Aachen, Allemagne, 1999, ISBN 3-8265-6017-5
- [29] G. Koepke, and M. Ma, «A new method to quantify the radiation characteristics of an unknown interference source», *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Suisse, pp. 35-40, Mars 1983
- [30] M. Ma, and G. Koepke, *Uncertainties in Extracting Radiation Parameters for an Unknown Interference Source Based on Power and Phase Measurements*, *National Institute of Standards and Technology (NIST, antérieurement NBS)*, Technical Note 1064, Juin 1983
- [31] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson, «Uncertainties due to cross-polar coupling in GTEM cell emission measurement», *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italie, pp. 590-595, 1998

- [17] C. Groh, J.P. Kaerst, M. Koch, and H. Garbe, "TEM Waveguides for EMC measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 440-445, Nov. 1999
- [18] C. Groh, J.P. Kaerst, and H. Garbe, "Einfluss der Beladung auf die Feldmoden in TEM Wellenleitern," (translation: "Influence of load on field modes in TEM waveguides"), *Elektromagnetische Vertraeglichkeit EMV 2000 (8. Intl. Symp. and Exhb. on EMC)*, VDE Verlag, Berlin, Germany, pp. 287-294, Feb. 2000, ISBN 3-8007-2522-3
- [19] C. Groh, *TEM Zellen zur Kalibration von elektromagnetischen Feldsensoren*, (translation: *TEM cells for calibration of electromagnetic field probes*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, (to be published)
- [20] T.E. Harrington, Z. Chen, and M. D. Foegelle, "GTEM radiated emissions testing and FDTD modeling," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, pp. 770-775, 1999
- [21] T.E. Harrington, "Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, pp. 23-28, 2000
- [22] T.E. Harrington, and E.L. Bronaugh, "EUT directivity and other uncertainty considerations for GHz-range use of TEM waveguides," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, QC, Canada, pp. 117-122, 2001
- [23] IEC 61000-2-9, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance*
- [24] IEEE Std 1309-1996: *IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996
- [25] J.P. Kaerst, C. Groh, and H. Garbe, "Field mode properties of loaded waveguides," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 481-486, Feb. 2001
- [26] J.P. Kaerst, *Qualifikation beladener TEM Wellenleiter*, (translation: *Validation of loaded TEM waveguides*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, (to be published)
- [27] M. Klingler, J. Rioult, J.-P. Ghys, and S. Ficheux, "Wideband total radiated power measurements of electronic equipment in TEM and GTEM cells," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 665-670, 1999
- [28] M. Koch, *Analytische Feldberechnung in TEM Zellen*, (translation: *Analytical Field Calculation in TEM Cells*), PhD-thesis, University of Hannover, *Shaker-Verlag*, Aachen, Germany, 1999, ISBN 3-8265-6017-5
- [29] G. Koepke, and M. Ma, "A new method to quantify the radiation characteristics of an unknown interference source," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 35-40, March 1983
- [30] M. Ma, and G. Koepke, *Uncertainties in Extracting Radiation Parameters for an Unknown Interference Source Based on Power and Phase Measurements*, *National Institute of Standards and Technology* (NIST, formerly NBS), Technical Note 1064, June 1983
- [31] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson, "Uncertainties due to cross-polar coupling in GTEM cell emission measurement," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italy, pp. 590-595, 1998

- [32] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson: «Indirect measurements of field uniformity in TEM cells Including cross-polar field components», *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Suisse, pp. 659-664, Mars 1999
- [33] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1998
- [34] T. Schrader, *Vergleich von Feldgeneratoren für EMV-Prüfungen*, (traduction: *Comparaison de générateurs de champ pour essais CEM*), PhD-thesis, University of Braunschweig, Allemagne, 1997
- [35] I. Sreenivasiah, D. Chang, and M. Ma, «Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell», *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 23, no. 3, pp. 113-121, Août 1981
- [36] E. Steinke, P. Wilson, and H. Garbe, «An equivalent «radiated emission» voltage measurement standard for TEM cells», *International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Pologne, pp. 301-304, Sept. 1992
- [37] M.J. Thelberg, E.L. Bronaugh, and J.D.M. Osburn, «GTEM to OATS radiated emissions correlation from 1 GHz to 5 GHz», *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, IL, pp. 387-392, 1994
- [38] J. Tippet, and D. Chang, «Radiation characteristics of electrically small devices in a TEM transmission cell», *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 18, no. 4, pp. 134-140, Nov. 1976
- [39] L. Turnbull, and A. Marvin, «A treatment of the phase properties of GTEM to open-area test-site correlation techniques», *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 1, pp. 62-69, Fév. 1998
- [40] P. Wilson, D. Hansen, and D. Koenigstein, «Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell», *IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, pp. 171-177, Mai 1989
- [41] P. Wilson, «On correlating TEM cell and OATS emission measurements», *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 1, pp. 1-16, Fév. 1995
- [42] CEI 61000-4-3, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-3: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques*
- [43] CISPR 16-4-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainties in standardized EMC tests*
- [44] CISPR 16-4-2, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 4-2: Incertitudes, statistiques et modélisation des limites – Incertitudes de mesures CEM*
- [45] CISPR 16-4-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-3: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistical considerations in the determination of EMC compliance of mass-produced products*
- [46] CISPR 16-4-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistics of complaints and a model for the calculation of limits*

- [32] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson: "Indirect measurements of field uniformity in TEM cells including cross-polar field components," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 659-664, March, 1999
- [33] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1998
- [34] T. Schrader, *Vergleich von Feldgeneratoren für EMV-Prüfungen*, (translation: *Comparison of Field Generators for EMC Tests*), PhD-thesis, University of Braunschweig, Germany, 1997.
- [35] I. Sreenivasiah, D. Chang, and M. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 23, no. 3, pp. 113-121, Aug. 1981
- [36] E. Steinke, P. Wilson, and H. Garbe, "An equivalent "radiated emission" voltage measurement standard for TEM cells," *International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Poland, pp. 301-304, Sept. 1992
- [37] M.J. Thelberg, E.L. Bronaugh, and J.D.M. Osburn, "GTEM to OATS radiated emissions correlation from 1-5 GHz," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, IL, pp. 387-392, 1994
- [38] J. Tippet, and D. Chang, "Radiation characteristics of electrically small devices in a TEM transmission cell," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 18, no. 4, pp. 134-140, Nov. 1976.
- [39] L. Turnbull, and A. Marvin, "A treatment of the phase properties of GTEM to open-area test-site correlation techniques," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 1, pp. 62-69, Feb. 1998
- [40] P. Wilson, D. Hansen, and D. Koenigstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," *IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, pp. 171-177, May 1989
- [41] P. Wilson, "On correlating TEM cell and OATS emission measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 1, pp. 1-16, Feb. 1995
- [42] IEC 61000-4-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*. Basic EMC publication
- [43] CISPR 16-4-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainties in standardized EMC tests*
- [44] CISPR 16-4-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainty in EMC measurements*
- [45] CISPR 16-4-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-3: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistical considerations in the determination of EMC compliance of mass-produced products*
- [46] CISPR 16-4-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistics of complaints and a model for the calculation of limits*

ISBN 2-8318-8962-6



ICS 33.100.10; 33.100.20

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND