

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61000-4-20

Première édition
First edition
2003-01

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

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 (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.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 (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.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 (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.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 (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.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

Première édition
First edition
2003-01

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 2003 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 photo-copie 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 **XB**

*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	12
3 Définitions et abréviations	14
3.1 Définitions	14
3.2 Abréviations	20
4 Généralités	20
5 Exigences concernant les guides d'onde TEM	22
5.1 Exigences générales pour l'utilisation des guides d'onde TEM	22
5.2 Exigences spécifiques pour certains types de guides d'onde TEM	26
5.3 Considérations à propos de l'incertitude de mesure	28
6 Vue d'ensemble des types d'appareils en essai	28
6.1 Petit appareil en essai	28
6.2 Appareil en essai de grande taille	28
Annexe A (normative) Essais d'émission dans les guides d'onde TEM	30
Annexe B (normative) Essais d'immunité dans les guides d'onde TEM	74
Annexe C (normative) Essais de transitoires IEM-HA dans les guides d'onde TEM	90
Annexe D (informative) Caractérisation des guides d'onde TEM	106
Annexe E (informative) Normes contenant des guides d'onde TEM	120
Bibliographie	124
Figure A.1 – Disposition du câble de sortie au coin à l'ortho-angle et au bord inférieur du volume d'essai	54
Figure A.2 – Positionneur d'ortho-axe ou manipulateur de base	56
Figure A.3 – Trois positions de rotation d'axe orthogonal pour les mesures d'émission	58
Figure A.4 – Orientations canoniques à 12 faces/axes pour un appareil en essai typique	60
Figure A.5 – Géométrie de l'emplacement d'essai en espace libre	62
Figure A.6 – Cellule TEM à deux accès (septum symétrique)	64
Figure A.7 – Cellule TEM à un accès (septum asymétrique)	66
Figure A.8 – Ligne ouverte (deux plaques)	70
Figure A.9 – Ligne ouverte (quatre plaques, alimentation équilibrée)	72
Figure B.1 – Exemple de montage d'essai pour guides d'onde TEM à polarisation unique	86
Figure B.2 – Points d'étalonnage de la zone uniforme dans un guide d'onde TEM	88
Figure C.1 – Amplitude spectrale dans le domaine fréquentiel entre 100 kHz et 300 MHz ...	104

CONTENTS

FOREWORD	7
INTRODUCTION	11
1 Scope and object	13
2 Normative references	13
3 Definitions and abbreviations	15
3.1 Definitions	15
3.2 Abbreviations	21
4 General	21
5 TEM waveguide requirements	23
5.1 General requirements for the use of TEM waveguides	23
5.2 Special requirements for certain types of TEM waveguides	27
5.3 Measurement uncertainty considerations	29
6 Overview of EUT Types	29
6.1 Small EUT	29
6.2 Large EUT	29
Annex A (normative) Emission testing in TEM waveguides	31
Annex B (normative) Immunity testing in TEM waveguides	75
Annex C (normative) HEMP transient testing in TEM waveguides	91
Annex D (informative) TEM waveguide characterization	107
Annex E (informative) Standards including TEM waveguides	121
Bibliography	125
Figure A.1 – Routing the exit cable to the corner at the ortho-angle and the lower edge of the test volume	55
Figure A.2 – Basic ortho-axis positioner or manipulator	57
Figure A.3 – Three orthogonal axis-rotation positions for emission measurements	59
Figure A.4 – Canonical 12-face/axis orientations for a typical EUT	61
Figure A.5 – Open-area test site geometry	63
Figure A.6 – Two-port TEM cell (symmetric septum)	65
Figure A.7 – One-port TEM cell (asymmetric septum)	67
Figure A.8 – Stripline (two plates)	71
Figure A.9 – Stripline (four plates, balanced feeding)	73
Figure B.1 – Example of test set-up for single-polarization TEM waveguides	87
Figure B.2 – Uniform area calibration points in TEM waveguide	89
Figure C.1 – Frequency domain spectral magnitude between 100 kHz and 300 MHz	105

Figure D.1 – Guide d'onde le plus simple (pas d'onde TEM !).	118
Figure D.2 – Guides d'onde pour propagation TEM.	118
Figure D.3 – Vecteur polarisation	118
Figure D.4 – Modèle de ligne de transmission pour propagation TEM	118
Figure D.5 – Guides d'onde TEM à un ou deux accès.	118
Tableau B.1 – Points d'étalonnage de la zone uniforme	78
Tableau B.2 – Niveaux d'essai	80
Tableau C.1 – Niveaux d'essai d'immunité aux perturbations rayonnées définis dans la présente norme	104

Withdrawn

Figure D.1 – Simplest waveguide (no TEM wave!).....119

Figure D.2 – Waveguides for TEM propagation 119

Figure D.3 – Polarization vector 119

Figure D.4 – Transmission line model for TEM propagation.....119

Figure D.5 – One- and two-port TEM waveguides.....119

Table B.1 – Uniform area calibration points 79

Table B.2 – Test levels.....81

Table C.1 – Radiated immunity test levels defined in the present standard 105

Withdrawn

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

La norme internationale CEI 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.

Le texte de la norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
CIS/A/419/FDIS	CIS/A/435/RVD

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

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

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 IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 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.

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

Committee draft	Report on voting
CIS/A/419/FDIS	CIS/A/435/RVD

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

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2004.
A cette date, la publication sera

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

Withdrawn

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2004. At this date, the publication will be

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

Withdrawn

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.

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.1.9

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

3.1.6**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**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**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).

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])

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

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).

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° (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])

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

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

3.2 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'Orde 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.

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 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 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.

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_{+6} dB et allant jusqu'à -0_{+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 (plan

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 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

transverse, 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:

- 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]).

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:

- 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 $0 < z < z_{\text{max}}$, 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 $z_{\text{min}} < z < z_{\text{max}}$, and the derivatives dh/dz and dw/dz are a smooth function for $z_{\text{min}} < z < z_{\text{max}}$ (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

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

où

A_{loss} 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 $\frac{1}{\text{m}}$;

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

Z_c is the characteristic impedance of the TEM waveguide (typically 50Ω) 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 $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$.

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.3.2.2.1 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 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

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

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.3.2.2.1 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 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

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

where

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

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

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