

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

BASIC EMC PUBLICATION

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

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

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 61000-4-20

Edition 2.0 2010-08

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

BASIC EMC PUBLICATION

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XC

ICS 33.100.10; 33.100.20

ISBN 978-2-88912-149-6

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope and object.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions and abbreviations	8
3.1 Terms and definitions	8
3.2 Abbreviations	11
4 General	11
5 TEM waveguide requirements.....	12
5.1 General	12
5.2 General requirements for the use of TEM waveguides	12
5.2.1 TEM mode verification	12
5.2.2 Test volume and maximum EUT size	12
5.2.3 Validation of usable test volume	13
5.3 Special requirements and recommendations for certain types of TEM waveguides	15
5.3.1 Set-up of open TEM waveguides	15
5.3.2 Alternative TEM mode verification for a two-port TEM waveguide	16
6 Overview of EUT types	16
6.1 General	16
6.2 Small EUT	16
6.3 Large EUT	16
7 Laboratory test conditions	17
7.1 General	17
7.2 Climatic conditions	17
7.3 Electromagnetic conditions	17
8 Evaluation and reporting of test results.....	17
Annex A (normative) Emission testing in TEM waveguides.....	19
Annex B (normative) Immunity testing in TEM waveguides.....	40
Annex C (normative) HEMP transient testing in TEM waveguides	46
Annex D (informative) TEM waveguide characterization.....	53
Annex E (informative) Calibration method for E-field probes in TEM waveguides	61
Bibliography.....	71
Figure A.1 – Routing the exit cable to the corner at the ortho-angle and the lower edge of the test volume	30
Figure A.2 – Basic ortho-axis positioner or manipulator	31
Figure A.3 – Three orthogonal axis-rotation positions for emission measurements.....	32
Figure A.4 – Twelve-face (surface) and axis orientations for a typical EUT	33
Figure A.5 – Open-area test site (OATS) geometry	34
Figure A.6 – Two-port TEM cell (symmetric septum)	35
Figure A.7 – One-port TEM cell (asymmetric septum)	36
Figure A.8 – Stripline (two plates)	38
Figure A.9 – Stripline (four plates, balanced feeding).....	39

Figure B.1 – Example of test set-up for single-polarization TEM waveguides	44
Figure B.2 – Uniform area calibration points in TEM waveguide	45
Figure C.1 – Frequency domain spectral magnitude between 100 kHz and 300 MHz	52
Figure D.1 – Simple waveguide (no TEM mode).....	59
Figure D.2 – Example waveguides for TEM-mode propagation.....	59
Figure D.3 – Polarization vector	59
Figure D.4 – Transmission line model for TEM propagation	59
Figure D.5 – One- and two-port TEM waveguides	60
Figure E.1 – An example of the measurement points for the validation.....	62
Figure E.2 – Setup for validation of perturbation	63
Figure E.3 – Setup for measuring net power to a transmitting device	66
Figure E.4 – Example of setup for calibration of E-field probe	67
Figure E.5 – Setup for calibration of E-field probe by another method.....	69
Figure E.6 – Equivalent circuit of antenna and measurement apparatus.....	70
 Table 1 – Values K for expanded uncertainty with normal distribution	 15
Table B.1 – Uniform area calibration points.....	42
Table B.2 – Test levels	42
Table C.1 – Radiated immunity test levels defined in the present standard	52
Table E.1 – Calibration frequencies	63
Table E.2 – Calibration field strength level.....	64

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

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

FOREWORD

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

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

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2003 and its amendment 1 (2006), and constitutes a technical revision.

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

The main changes with respect to the first edition of this standard and its amendment are the following:

- consistency of terms (e.g. test, measurement, etc.) has been improved;

- clauses covering test considerations, evaluations and the test report have been added;
- references to large TEM waveguides have been eliminated;
- a new informative annex has been added to deal with calibration of E-field probes.

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

FDIS	Report on voting
77B/637/FDIS	77B/641/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.

A list of all parts of the IEC 61000 series, published under the general title *Electromagnetic compatibility (EMC)*, can be found on the IEC website.

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

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

INTRODUCTION

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 are and will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision (example: IEC 61000-6-1).

This part of IEC 61000 is an International Standard which gives emission, immunity and HEMP transient testing requirements.

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. These types include open structures (for example, striplines and electromagnetic pulse simulators) and closed structures (for example, TEM cells). These structures 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 tests;
- the EUT (i.e. EUT cabinet and cabling) definition;
- test set-ups, procedures, and requirements for radiated emission testing in TEM waveguides and
- test set-ups, procedures, and requirements for radiated immunity testing in TEM waveguides.

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

This standard does not intend to specify the tests to be applied to any particular apparatus or system(s). The main intention of this standard is to provide a general basic reference for all interested product committees of the IEC. For radiated emissions testing, product committees should select emission limits and test methods in consultation with CISPR standards. For radiated immunity testing, product committees remain responsible for the appropriate choice of immunity tests and immunity test limits to be applied to equipment within their scope. This standard describes test methods that are separate from those of IEC 61000-4-3.¹

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 – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

IEC 61000-2-11:1999, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments*

¹ These other distinct test methods may be used when so specified by product committees, in consultation with CISPR and TC 77.

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*

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

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

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

CISPR 16-1-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements*

CISPR 16-2-3:2006, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity – Radiated disturbance measurements*

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

3 Terms, definitions and abbreviations

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050(161), as well as the following, apply.

3.1.1

transverse electromagnetic mode

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 propagated in the transverse electromagnetic mode to produce a specific field for testing purposes

3.1.3

TEM cell

closed TEM waveguide, often a rectangular coaxial transmission line, in which a wave is propagated in the transverse electromagnetic mode to produce a specific field for testing purposes and with an outer conductor completely enclosing an inner conductor

3.1.4

two-port TEM waveguide

TEM waveguide with input/output ports at both ends

3.1.5

one-port TEM waveguide

TEM waveguide with a single input/output port

NOTE Such TEM waveguides typically feature a broadband transmission-line termination at the non-port end.

3.1.6

stripline

terminated transmission line consisting of two or more parallel plates between which a wave is propagated in the transverse electromagnetic mode to produce a specific field for testing purposes

NOTE Striplines usually have open sides 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, and which may be positioned symmetrically or asymmetrically with respect to the outer conductor

3.1.8

outer conductor or chassis

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 and which is independent of the voltage/current magnitudes and depends only on the cross-sectional geometry of the transmission line

NOTE TEM waveguides are typically designed to have a characteristic impedance of 50 Ω . TEM waveguides with a characteristic impedance of 100 Ω 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 transmission-line termination

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 volume of high-frequency anechoic material

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 cable exiting the usable test volume

NOTE Test volume is specified in 5.2.2.

3.1.15

interconnecting cable

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

3.1.16

test set-up support

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

NOTE A typical material is foamed polystyrene. Wooden supports are not recommended (see [4]²).

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°

NOTE 1 Figure A.2a shows a diagram of the ortho-angle.

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 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 test set-up support similar to a turntable, and capable of supporting an affixed EUT throughout numerous positions as required by a correlation algorithm or test protocol

NOTE An example of a manipulator design is shown in Figure A.2.

3.1.22

hyper-rotated TEM waveguide

TEM waveguide that has been reoriented such that its ortho-axis is normal to the surface of the Earth

NOTE Additional details are given in [6].

3.1.23

gravity-dependent / -independent

the gravitation force of the earth has a fixed direction. The EUT can be rotated around all three axes. Due to different rotation positions, the EUT is affected by the gravitation force in different directions. The EUT is gravity-independent if it is working properly in all positions,

2 Figures in square brackets refer to the bibliography.

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
HEMP	high-altitude electromagnetic pulse
OATS	open-area test site
PoE	points of entry
RF	radio frequency
SAC	semi-anechoic chamber
SPD	surge protective device
TDR	time-domain reflectometer
TE	transverse electric (mode), (H-mode)
TEM	transverse electromagnetic
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. Various general properties of TEM waveguides are described 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.

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 the Bibliography. Field generation properties can also be used for measuring field strength, see Annex E and other publications listed in the Bibliography.

TEM waveguide tests 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. For further information see Bibliography.

5 TEM waveguide requirements

5.1 General

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

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 Annex A, Annex B, and Annex C, respectively.

5.2 General requirements for the use of TEM waveguides

5.2.1 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. This verification of the TEM mode applies to waveguides used either for immunity or emissions testing. The TEM mode behaviour shall be confirmed at regular intervals (see 5.2.3).

NOTE 1 Generally, a TEM waveguide manufacturer should verify and document the TEM mode behaviour over the desired frequency range and include verification data with the system documentation.

Using an immunity-type uniform-area verification procedure (according to 5.2.3) 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 tested points in a defined cross-section of the TEM waveguide (perpendicular to the propagation direction). For this 75 % of test 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 5 % of the test frequencies (at least one frequency), provided that the actual tolerance and frequencies are 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.

NOTE 2 The TEM field is the dominant mode and the cavities are low Q values, therefore resonances are not expected to be narrow. For this reason the use of logarithmic frequencies is acceptable for TEM mode verification testing.

NOTE 3 For transient tests the start frequency should be 100 kHz.

NOTE 4 The 6 dB criterion from 5.2.1 specifies the dominant TEM mode and not the field uniformity, and is separate from and not to be confused with the field uniformity requirements of 5.2.3. Further information about field uniformity is given in [17].

5.2.2 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 5.2.3. The propagation direction of the waveguide TEM mode (typically z -axis) is perpendicular to a uniform area (transverse plane, typically xy -plane). In the xy -plane the entire cross-section of the usable test volume has to fulfil the requirements of the uniform area defined in 5.2.3. 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 5.2.3) 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 $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$. The length of the test volume is $L = z_{\max} - z_{\min}$. The requirements of a uniform area shall be validated for cross-sections at each z with $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$. It can be assumed that the TEM mode requirements are fulfilled for $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ 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 $0 < z < z_{\max}$, or,
- if TEM mode requirements are fulfilled at the positions z_{\min} and z_{\max} , and the waveguide cross-section is constant or uniformly tapered for $z_{\min} < z < z_{\max}$ and the derivatives dh/dz and dw/dz are a smooth function for $z_{\min} < z < z_{\max}$ (no kinks or steps in the conductor geometries).

The maximum size of an EUT is related to the size of the usable test volume. The EUT shall be verified not to 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 462F 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 should 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. More information about loaded waveguide effects is given in [25].

5.2.3 Validation of usable test volume

5.2.3.1 General considerations

This subclause uses the concept of a "uniform area" which is a hypothetical area in which variations of the field magnitude are acceptably small (see [15]). The TEM waveguide dimensions determine the size of this uniform area (plane), unless the EUT can be fully illuminated in a smaller surface. The maximum size of an EUT is related to the size of the usable test volume (see 5.2.2).

NOTE 1 In general the exact form and the location of the uniform area are not specified, but are determined using the procedures of this standard.

NOTE 2 If no other definition is given, the uniform area should be a vertical plane orthogonal to the propagation direction of the field. It should be one plane face area in front of the EUT.

NOTE 3 The vertical plane assumes that the direction of TEM mode propagation is near horizontal (aligned to the z -axis) and plane wave propagation is given. If the TEM mode propagation direction is in some other direction, the uniform area plane may be re-orientated accordingly.

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

In principle, the uniform area may be located at any distance from the input port; the location will depend on the specific waveguide geometry. The uniform area is valid only for that distance from the input port at which it is calibrated. To allow EUT rotation, the uniform area

shall be spaced a distance at least greater than the largest case dimension away from the end of the usable test volume z_{\max} defined in 5.2.2.

The uniform area is validated in the empty enclosure, for the frequency range and frequency steps specified in 5.2.1 using a non-modulated signal.

Depending on the size of the uniform area, it is validated at least with 5 measurement points (4 at the corners and one at the centre). The spacing between two test points has to be smaller than 50 cm. If the 50 cm limit is exceeded, an equally spaced grid has to be used for the test points. This means that 9 points shall be used.

5.2.3.2 Field uniformity and TEM mode measurement procedure

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

- position the isotropic 3-axis probe at one of the points in the grid;
- apply a forward power to the TEM waveguide input port so that the electric field strength of the primary field component is in the range of the given limit E_{Limit} through the frequency range and frequency steps specified in 5.2.1, and record all the forward power, primary and secondary components field strength readings;
- with the same forward power, measure and record the primary and secondary field strengths at the remaining grid points;
- calculate the standard deviation according to Equation (1). All measurement results are expressed in dB(V/m);
- the primary field component magnitude of the remaining points shall lie within a range of 6 dB. The level of the secondary field components shall not exceed –6 dB of the primary field component at each of these points;
- of the remaining points, take the location with the lowest primary field component E_{ref} as the reference (this ensures the ${}_{+6}^{-0}$ dB requirement is met);
- knowing the forward power and the field strength, the necessary forward power for the required test-field strength can be calculated using Equation (1), and shall be recorded.

$$P_{\text{test}} = \frac{E_{\text{test}}^2}{E_{\text{ref}}^2} P_{\text{fwd}} \quad \text{with } E \text{ in V/m and } P \text{ in W} \quad (1)$$

EXAMPLE If at a given point, 81 W gives 9 V/m, then 9 W is needed for 3 V/m.

Alternatively, an equivalent procedure is to establish a constant primary component electric field strength in the range of the given E_{Limit} and record the forward power delivered to the input port. Next, steps a), d), e), f) and g) shall be applied. This method is known as the “constant field strength” method.

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

5.2.3.3 Field uniformity criteria

The uniformity of the field is determined as follows.

At test point i the measured field strength is given as E_i . The mean-value and the standard deviation are calculated for N test points.

$$\text{Mean: } \bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{(N)} E_i \quad (2)$$

$$\text{Standard deviation: } \sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{(N)} (E_i - \bar{E})^2} \quad (3)$$

In the statistical sense $N = 5$ reflects a very small quantity but nevertheless a normal distribution for the measurements E_i can be assumed. For the probability that 75 % of the measurement results will fall in the range

$$\bar{E} - K \cdot \sigma_{\bar{E}} \leq E_i \leq \bar{E} + K \cdot \sigma_{\bar{E}} \quad (4)$$

the factor K is chosen to be 1,15.

Table 1 – Values K for expanded uncertainty with normal distribution

Factor K	1	1,15	1,3	1,5	2	3
Probability %	68,3	75,0	80,6	86,6	95,5	99,7

Dealing with dB-values often the probability is requested whether the measurement E_i falls into the band according to Equation (5).

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + E_{\text{Margin}} \quad (5)$$

Comparing this band with Equation (4) gives Equation (6).

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + 2 \cdot K \cdot \sigma_{\bar{E}} \quad (6)$$

$$\sigma_{\bar{E}} \leq \frac{\text{Margin}}{2 \cdot K} \quad (7)$$

For 75 % = $K = 1,15$ and a margin of 6 dB the standard deviation shall be

$$\sigma_{\bar{E}} \leq \frac{6 \text{ dB}}{2 \cdot 1,15} = 2,61 \text{ dB}.$$

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

5.3 Special requirements and recommendations for certain types of TEM waveguides

5.3.1 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 levels are defined in Annexes A, B, and C and strongly depend 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 recommended. Additional anechoic material can be placed appropriately in the shielded room to minimize reflections. These distances are given for guidance only. 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 461F 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 462F 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 .

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

As an alternative to the provisions in 5.2.1, the useful frequency range of a two-port TEM waveguide can be established using the following verification 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 fulfil

$$A_{\text{tloss}} = \left| 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{fwd}}} - \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{fwd}}} \right) \right| \leq 1 \text{ dB} \quad (8)$$

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 (8) is valid for characteristic impedance of 50 Ω .

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

6 Overview of EUT types

6.1 General

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 and emission testing to allow a uniform arrangement in the test volume.

6.2 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.

6.3 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.

7 Laboratory test conditions

7.1 General

In order to minimize the effect of environmental parameters on test results, the test shall be carried out in climatic and electromagnetic reference conditions as specified in 7.2 and 7.3.

7.2 Climatic conditions

Unless otherwise specified by the committee responsible for the generic or product standard, the climatic conditions in the laboratory shall be within any limits specified for the operation of the EUT and the test equipment by their respective manufacturers.

Tests shall not be performed if the relative humidity is so high as to cause condensation on the EUT or the test equipment.

NOTE Where it is considered that there is sufficient evidence to demonstrate that the effects of the phenomenon covered by this standard are influenced by climatic conditions, this should be brought to the attention of the committee responsible for this standard.

7.3 Electromagnetic conditions

The electromagnetic conditions of the laboratory shall be such as to guarantee the correct operation of the EUT in order not to influence the test results.

8 Evaluation and reporting of test results

Testing shall be performed according to a test plan which shall be included in the test report. Test results and reporting requirements are dependent upon the type of test being performed.

The test report shall contain all the information necessary to reproduce the test. In particular, the following shall be recorded:

- the items specified in the test plan;
- identification of the EUT and any associated equipment, for example, brand name, product type, serial number;
- identification of the test equipment, for example, brand name, product type, serial number;
- any special environmental conditions in which the test was performed;
- any specific conditions necessary to enable the test to be performed;
- performance level defined by the manufacturer, requestor or purchaser;
- for immunity, performance criterion specified in the generic, product or product-family standard;
- any effects on the EUT observed during or after the application of the test disturbance, and the duration for which these effects persist;
- for immunity, the rationale for the pass/fail decision (based on the performance criterion specified in the generic, product or product-family standard, or agreed between the manufacturer and the purchaser);

- any specific conditions of use, for example cable length or type, shielding or grounding, or EUT operating conditions, which are required to achieve compliance;
- drawing and/or pictures of the test set-up and EUT arrangement.

Annex A (normative)

Emission testing in TEM waveguides

A.1 Overview

This annex describes emission testing in TEM waveguides.

Emission tests made in TEM waveguides may be compared with limits derived in one of two ways:

- **TEM waveguide-based limits**

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 the Bibliography. In this case, TEM waveguide test results 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]).

- **OATS-based limits**

This approach is applicable for EUTs which have to comply with disturbance limits given in terms of field strength at an OATS. A correlation algorithm is used to derive the OATS field strength from TEM waveguide tests.

Only the second case is described in detail in this annex. Emission testing using TEM waveguides requires a validation 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 5. 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 test data.

Correlation 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 standards.

NOTE The test procedures typically require that the EUT be rotated about all three axes. If a hyper-rotated TEM waveguide is used (see [6]), the TEM waveguide is re-oriented so that its ortho-axis is normal to the surface of the Earth. 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.

A.2 Test equipment

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

NOTE An isotropic field sensor can be seen as an antenna (see CISPR 16-1-4 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 subclause describes an algorithm based on the assumption that the radiated power, as derived from a

TEM waveguide measurement, will be radiated by a dipole positioned above a perfectly conducting ground plane.

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. 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 tested. The correlation routine then uses these data to simulate an OATS test.

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

A.3.2 Correlation algorithms

A.3.2.1 General

Subclauses A.3.2.2 and A.3.2.3 show independent correlation approaches. Subclause A.3.2.2 describes the basic approach of correlation routines for the “multipole model,” and uses a set of waveguide tests in order to determine the equivalent multipole moments. Subclause A.3.2.3 describes another correlation routine which uses three voltage measurements. This latter procedure is often referred to as the “total radiated power method”.

A.3.2.2 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.

The basic approach of correlation algorithms between TEM waveguides and open-area test site or free space data is to use a set of TEM waveguide tests 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-orientation method, radiated power is estimated, but not the individual multipole moments. Once the radiated power is estimated, radiated fields either in free space or over an infinite ground plane may be derived 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 emission tests have been shown there.

A.3.2.3 One-port TEM waveguide correlation algorithm

A.3.2.3.1 General

The one-port correlation algorithm 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.

A.3.2.3.2 TEM waveguide voltage measurements

The voltages are measured for three orientations of the EUT that are specified 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

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

where

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

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

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

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

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

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

NOTE For some EUTs, it may be necessary to test three orthogonal orientations at each of four start orientations (start orientations a1, a2, a3 and a4 in Figure A.4) for a total of 12 canonical orientations. The maximum voltage measurement and the voltage measurements from the two corresponding orthogonal orientations are then used in the usual three-orientations method [21].

A.3.2.3.3 Determining the field factor

A.3.2.3.3.1 General

The algorithm described here requires the primary y -component 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.

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

A.3.2.3.3.2 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

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

A.3.2.3.3.3 Analytical procedure

For a TEM cell with a rectangular cross-section as shown in [41] the normalized TEM mode component can be analytically approximated with the equation

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

where

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

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

h is the septum height at z , in m;

g is the gap width at z , in m;

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

J_0 is the zero-order Bessel function, dimensionless.

Only a few terms of this series need to be retained for a good approximation of e_{0y} . Field factor results for a variety of geometries are given in [28].

A.3.2.4 Correlation to OATS

EUT emissions over a ground plane are simulated by assuming that the total radiated power, as estimated by the TEM waveguide tests, is the same as that emitted by a dipole (replacing the EUT).

The equations for the fields from a dipole are well known and the ground plane is accounted for by introducing an image dipole. The fields are calculated over the equivalent height scan of the receiving antenna as required by the OATS method. The maximum signal from the two polarizations then gives 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

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

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

where

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

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

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

Z_C is the characteristic impedance in Ω ;

e_{0y} is the TEM-mode field factor in $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$

and

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

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

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

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

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

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

h_g height of EUT above ground plane, in m;

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

NOTE 1 The maximum free-space, far-zone electric field at a distance r is given by $E_{\max} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi}} D_{\max} P_0$, where D_{\max} is the maximum directivity of the antenna. Equation (A.5) follows from setting D_{\max} equal to 3 and accounting for the image antenna and distance r via the geometry factor g_{\max} . The value 3 is an upper limit for a small antenna and follows from the presence of an electric and a magnetic dipole both orientated and phased for maximum directivity. For an electric or magnetic dipole alone $D_{\max} = 1,5$. This is the more likely case for an unintentional radiator since one source type should be dominant. In this sense, Equation (A.5) may be viewed as “worst case”.

Generally, D is given by either an assumed value, or a value known *a priori*, or the measured directivity of the EUT. The one-port TEM waveguide correlation algorithm has always assumed a “worst-case” estimate based on a) total radiated power versus the OATS scanning volume or cone and b) the implicit worst-case directivity choice. For comparison with other total radiated power emissions test methods, for example, reverberation chambers, directivities of $D = 1,5$ or $D = 1,7$ may be used. For the purposes of this standard, it has been agreed to use a “worst-case” small-EUT directivity of $D = 3$.

NOTE 2 This correlation is valid for small EUTs as defined in 5.2. Some informative guidance for large EUT correlation and set-up methods is also included in this standard (A.5.1.2).

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

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

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

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

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

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

$$E_{\max}|_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg(g_{\max}) + 20 \cdot \lg\left(\left|\frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{0y}}\right|\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{S^2}{Z_C}\right) + 120, \text{ in dB}(\mu\text{V/m}) \quad (\text{A.9})$$

A.4 Emission test correction factors

A.4.1 Reference emission sources

Correction factors can be determined using a set of reference emission sources with well-characterized OATS-method emission responses. The reference sources are selected on the basis of the types of EUTs that will be tested in the TEM waveguide. Five types of reference sources are recommended to represent general EMC applications. These represent variations of table-top equipment as defined in CISPR 22.

- A battery-powered comb generator with a broadband antenna, which is an example of a small EUT. The largest dimension of the comb generator should be smaller than $0,1 h$, where h is the conductor spacing. If there is no comb generator available on the market that fulfils the size requirement, a comb generator up to $0,35 h$ may be used. In this case the size and type of the used comb generator and the regularly allowed size ($0,1 h$) are stated at the same position of the test protocol and are marked specially. The EUT case should be smaller than one wavelength at the highest frequency tested (see 6.2).

- b) A battery-powered comb generator with a wire attached, which is an example of a large EUT without exit cables (see 6.3). The attached wire should extend to the edge of, but remain within, the usable test volume.
- c) A battery-powered comb generator with an attached exit cable, which is an example of a large EUT with exit cables. The attached wire runs to and through a ferrite clamp.
- d) A (480 mm) case with a built-in comb generator, with at least two exit cables, intended to be an example of a large EUT with exit cables.
- e) As in terms a) to d), with a built in broadband noise source.

For examples a) to d), the comb generator should produce spectral lines every 10 MHz or less over the entire frequency range of interest. For example e), the broadband source should cover the entire frequency range of interest.

The output spectrum should be stable with variations of less than 1 dB during the test duration.

NOTE If the largest dimension of the source is smaller than $0,1 \lambda$, minimal perturbation of the TEM mode can be assumed.

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

A.4.2 Arrangement of small EUTs

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

A.4.3 Calculation of the small EUT correction factor

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

NOTE 1 The emission measurement in TEM waveguides is based on the total radiated power method. Therefore, all possible orientations are considered. When comparing OATS data with TEM waveguide measurements, the operator should select the orientation of the EUT on the OATS with the maximum emission.

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

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

where

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

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

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

NOTE 2 Even a small EUT may not have an omnidirectional radiation pattern. This difference should be taken into account by the factor t in Equation (A.10). Measurements on different OATS and in different TEM waveguides may result in deviations also. This is taken into account by $d_{s,f}$ in Equation (A.10). The typical order of magnitude of t and $d_{s,f}$ is 1 dB.

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

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

where

$g_{i,f}$ is the TEM waveguide electric field strength correlated with free space (A.3.2.4), in $\frac{V}{m}$;

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

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

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

f is the frequency, in Hz;

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

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

NOTE 3 The quantities $g_{i,f}$ and $o_{k,f}$ follow a log-normal distribution and therefore the Equation (A.11) can be expressed in logarithmic scale in this case.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

NOTE 4 If the TEM waveguide is unique ($n = 1$), for example, built for scientific use in a single laboratory, then $s_{\text{TEM},f} = 0$ for the determination of the correction factor of this specific waveguide. Therefore, these results cannot be used for the validation of any other TEM waveguide, even of the same type and size.

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

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

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

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

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

NOTE 5 An alternative to the t -factor (radiation pattern uncertainty factor) may be the six-position method of [27], or the 12-position method ("enhanced three-position") of [37]. The important issue is that EUT total radiated power should be captured. Comparison data are shown in [20] and [21].

A.5 Emission test procedures in TEM waveguides

A.5.1 EUT types

A.5.1.1 Small EUTs

A small EUT shall be tested using two start orientations in the TEM waveguide. The first start orientation is arbitrary, while the second start orientation is the first start orientation rotated as shown in Figure A.4. For each start orientation, the applicable correlation algorithm EUT rotations are performed. For example, the three-orientation method of A.3.2.3.2 requires that three orientations be tested. This procedure shall be carried out with start orientation a1 and a3, or a2 and a4 of Figure A.4 (a total of $2 \times 3 = 6$ orientations). The highest correlated field strength from these two data sets shall be reported at each frequency.

NOTE The frequency range is determined by the applicable limit or test objective, usually 30 MHz to 1 GHz for small EUTs. The usable frequency range is determined in the TEM mode verification tests (see 5.2.1, 5.3.2).

A.5.1.2 Large EUTs

The method of A.5.1.1 can be applied to large EUTs. However, the dipole assumption in the correlation algorithm may not be valid for large EUTs.

The following information is given for guidance purposes.

For compliance testing of large EUTs in TEM waveguides, the following procedure has been proposed. Further details are given in [2].

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

A.5.2 EUT arrangement

The following information is given for guidance purposes.

The EUT is placed in the centre of the usable test volume (5.2.2) on a manipulator (3.1.21 and Figures A.1, A.2b and A.2c or on a test set-up support (3.1.16).

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

For EUTs with cable(s) the following cable routing applies. Long cables should be bundled according to the rules stated in 7.2.5.2 of CISPR 16-2-3:2006. The interconnecting cable(s) should be routed perpendicularly from each case. In order to obtain repeatable measurement results, the relative positions of the interconnecting cable(s) and of the EUT should not change throughout the three-orientation correlation algorithm. If the cable(s) are too long, the interconnecting cable(s) can be bundled according to 7.2.5.2 of CISPR 16-2-3:2006.

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

A.6 Test report

The report shall include both the corrected (E) and uncorrected (E_{\max}) field strength results, as determined according to

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

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

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

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

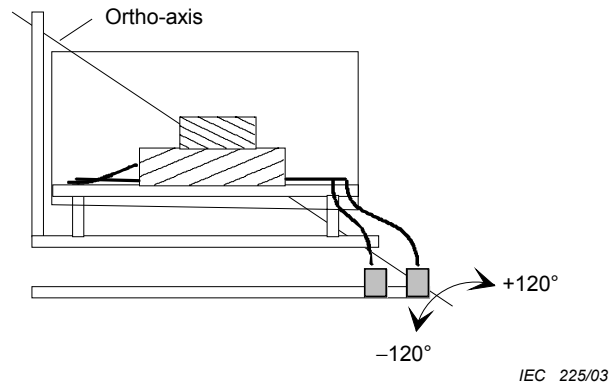


Figure A.1a – Side view

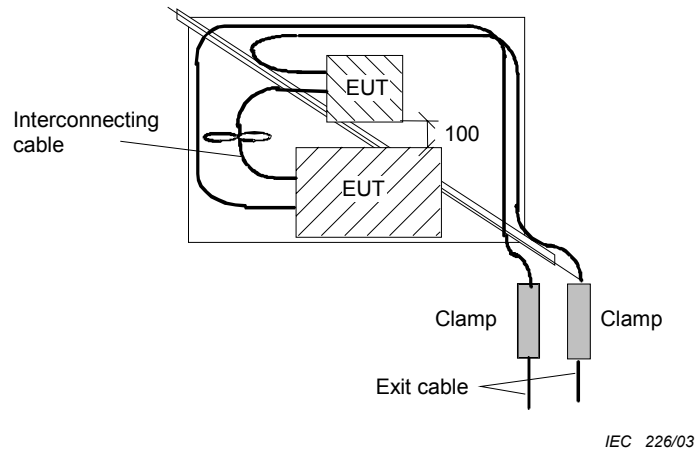


Figure A.1b – Top view

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

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

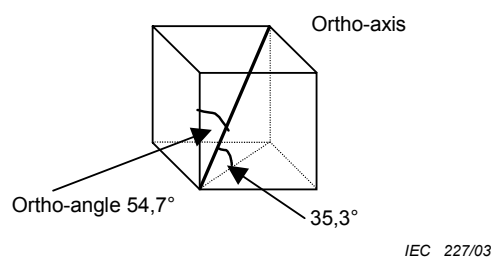


Figure A.2a – The ortho-axis and the ortho-angle

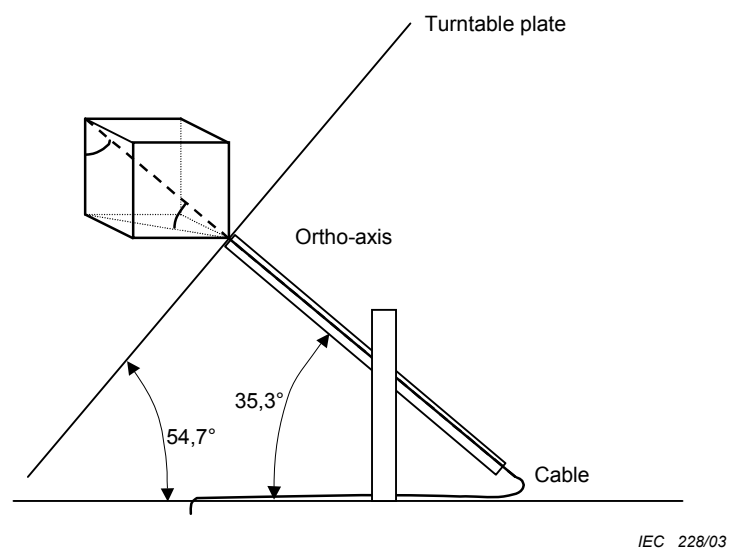


Figure A.2b – Side view (see 3.1.21 and A.5.2)

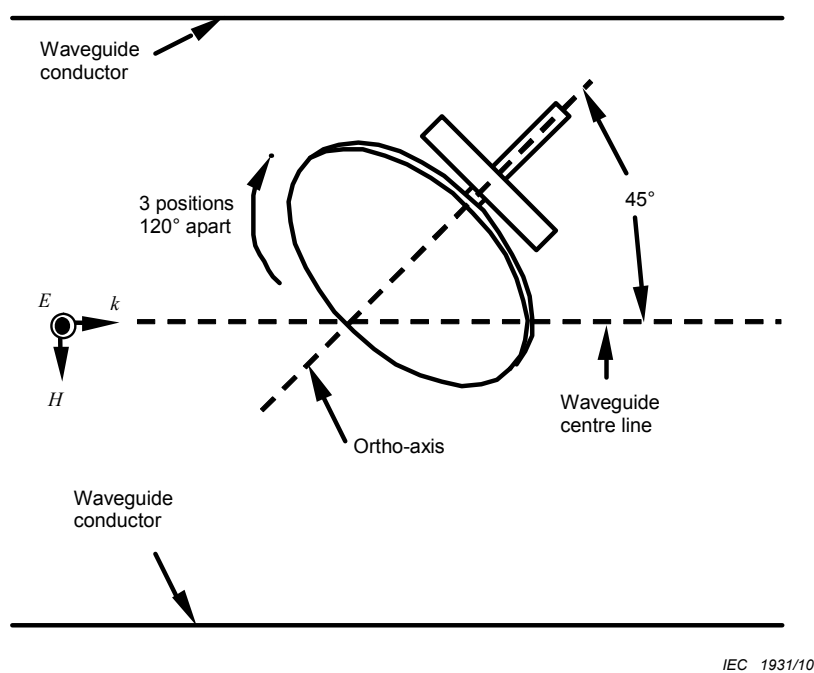
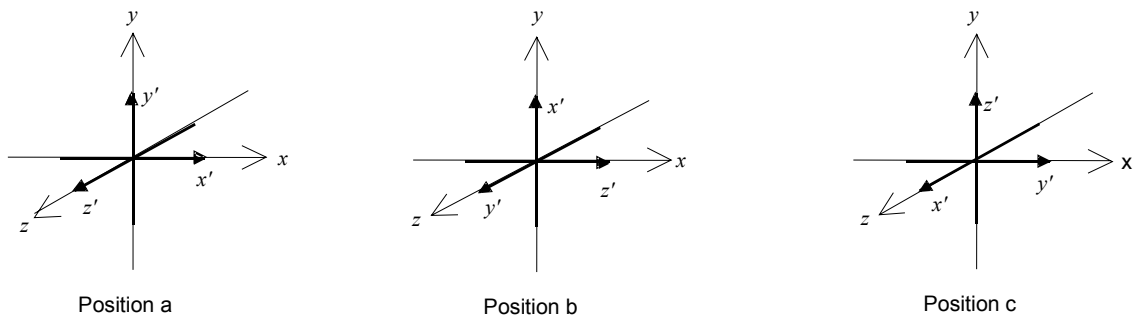


Figure A.2c – Top view (see 3.1.21 and A.5.2)

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

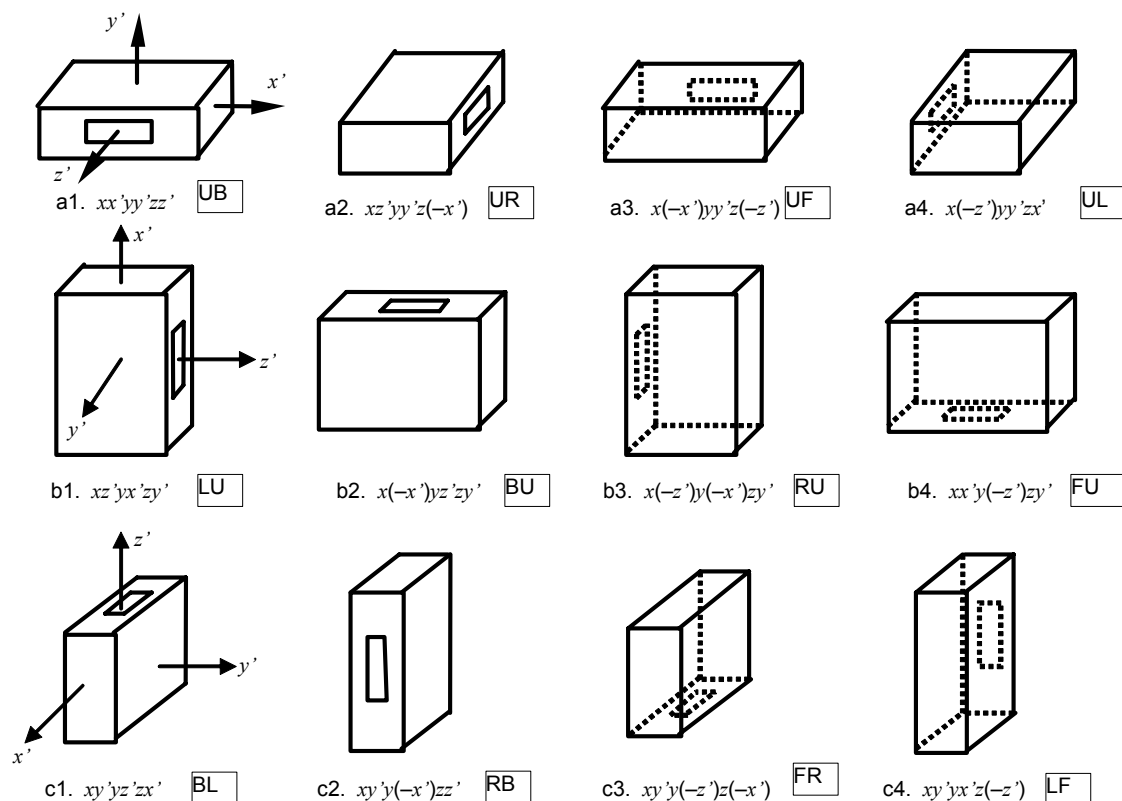
Figure A.2 – Basic ortho-axis positioner or manipulator



IEC 1932/10

NOTE These three orthogonal axis rotation positions correspond to orientations a1, b1, and c1 in Figure A.4. TEM waveguide coordinate axes x , y , z use symbols without prime marks, while the EUT coordinate axes x' , y' , z' use prime mark notation.

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



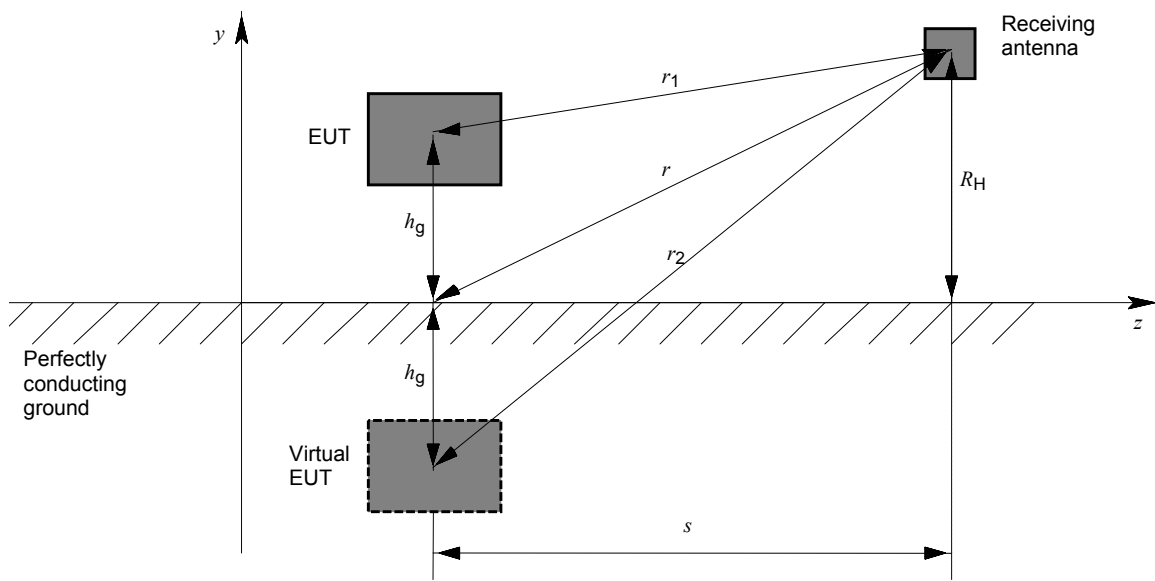
IEC 1933/10

NOTE 1 In this example, x, y, z refer to the TEM waveguide coordinate axes, x', y', z' are the EUT coordinate axes, and the field is polarized along the y -axis and propagating along the z -axis. The virtual (or geometric or phase) centre of the EUT should remain at the same position relative to TEM waveguide conductors.

NOTE 2 The sides of the EUT are defined by orientation a1 with $x' = x, y' = y, z' = z$: Left (L) = Right (R) $\equiv y'z' = yz$ plane, Back (B) = Front (F) $\equiv x'y' = xy$ plane, Top (T) = Underside (U) $\equiv x'z' = xz$ plane. The propagation direction is aligned with the z -axis. Therefore, the wave front in a1 is the back side. Each orientation of the EUT can be described by two letters: the first letter designates the side of the EUT facing the TEM waveguide floor, and the second letter designates the side facing the wave front (towards the propagation direction).

NOTE 3 Each column of this figure/matrix (for example, a3, b3, c3) shows a set of three orthogonal orientations that can be used for the three-orientation correlation algorithm. Similarly, in an immunity test, the minimum eight faces are given by, for example, the two sets of four orientations a1, a2, a3, a4, and b1, c2, b3, c4. When all 12 orientations are needed in an immunity test, add orientations c1, b2, c3, b4, where c3 and b4 would typically be rotated around the z -axis by 180° . In this case c3 with $xy'y(-z')z(-x')$ becomes $x(-y')yz'z(-x')$, and b4 with $xx'y(-z')zy'$ becomes $x(-x')yz'zy'$.

Figure A.4 – Twelve-face (surface) and axis orientations for a typical EUT



IEC 1934/10

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

Figure A.5 – Open-area test site (OATS) geometry

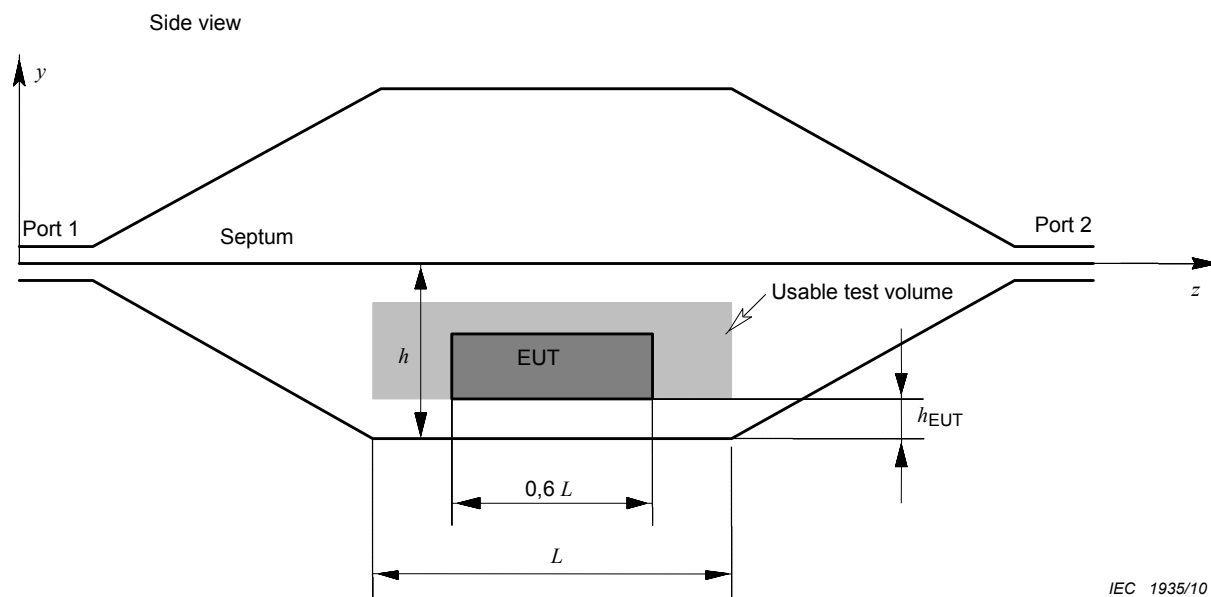


Figure A.6a – Side view

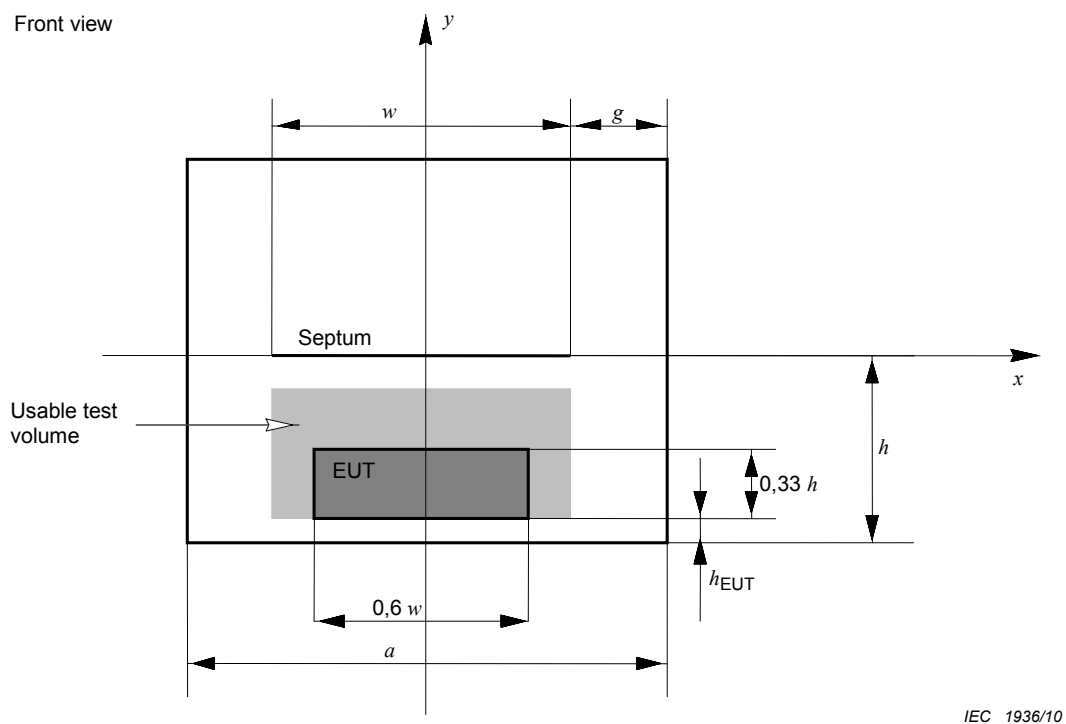


Figure A.6b – Cross-section view

NOTE h_{EUT} is the minimum distance between the EUT and each conductor or absorber of the waveguide

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

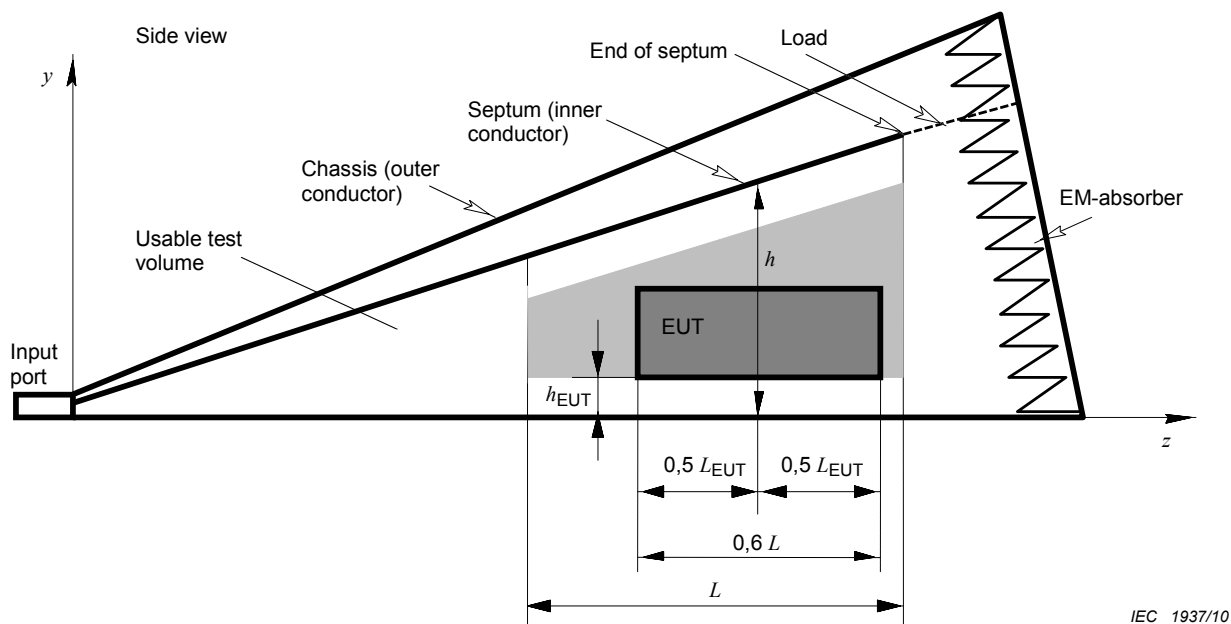


Figure A.7a – Side view

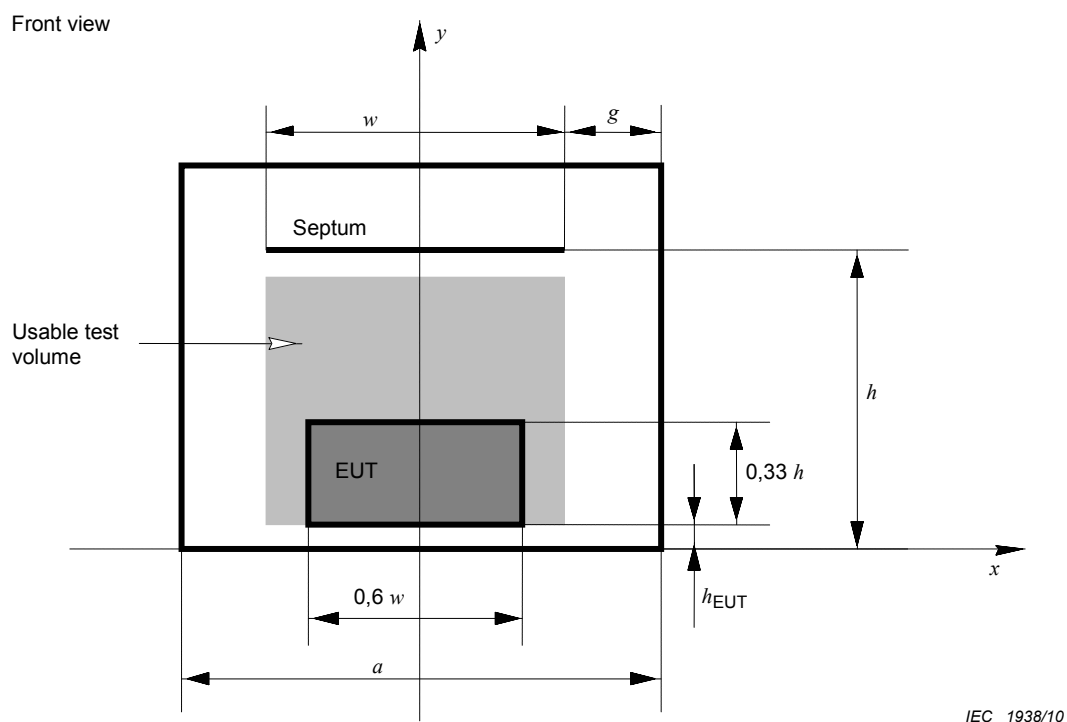
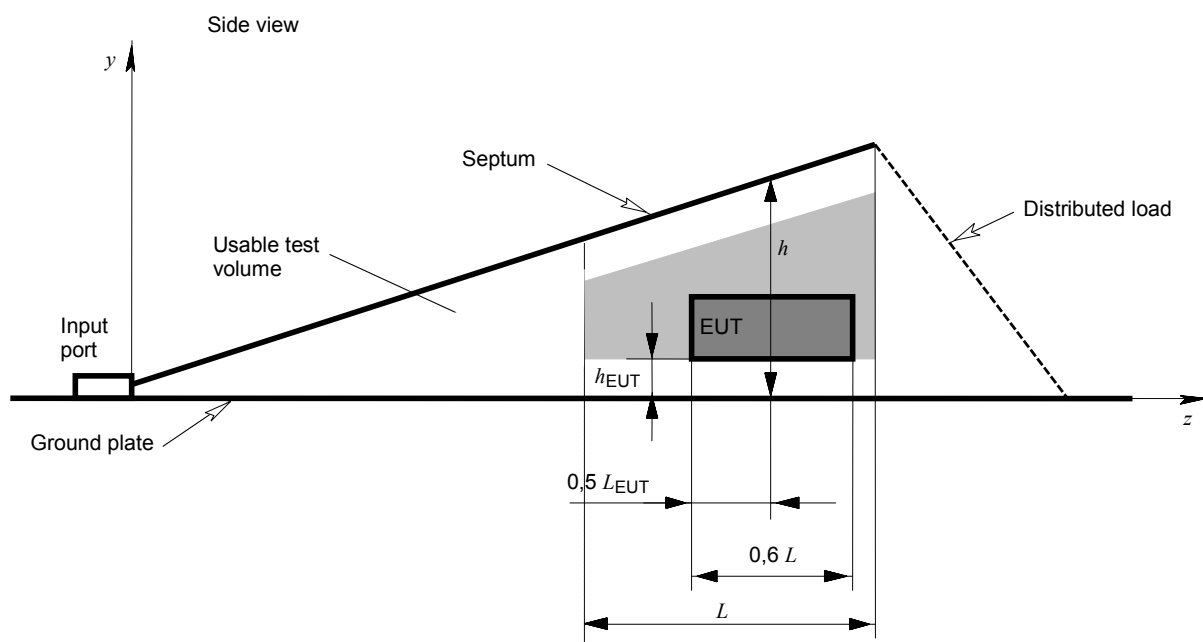


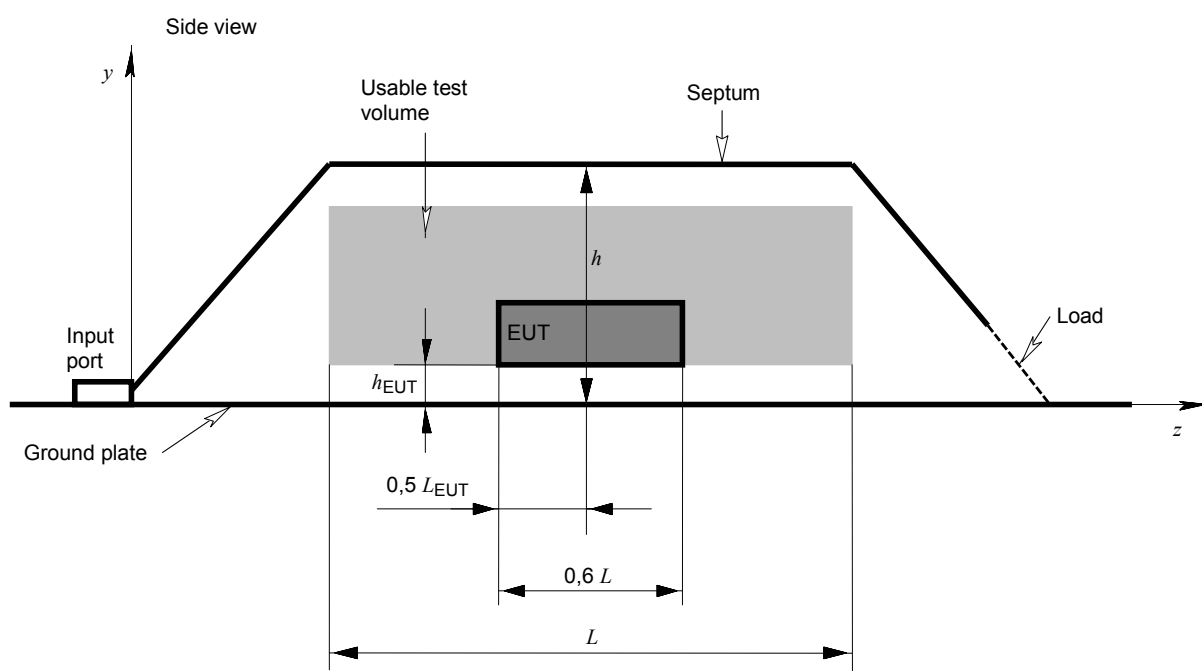
Figure A.7b – Cross-section view

NOTE h_{EUT} is the minimum distance between the EUT and each conductor or absorber of the waveguide

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



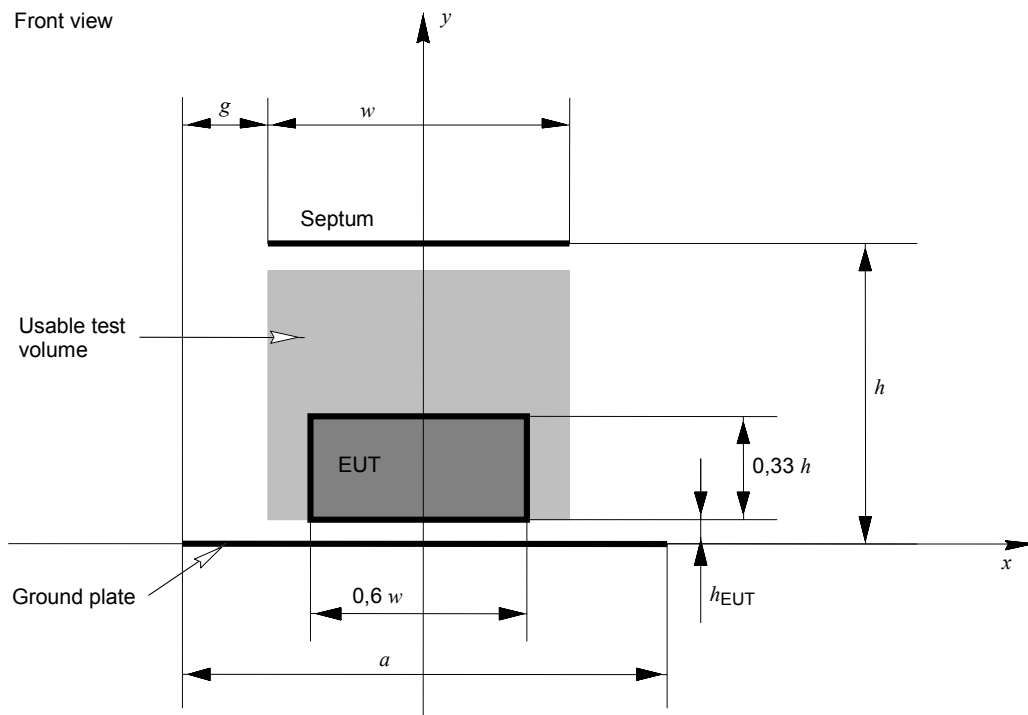
IEC 1939/10

Figure A.8a – Side view (one-port)

IEC 1940/10

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

Figure A.8b – Side view (basically similar to a two-port TEM waveguide, but some versions have a distributed load at the output port)

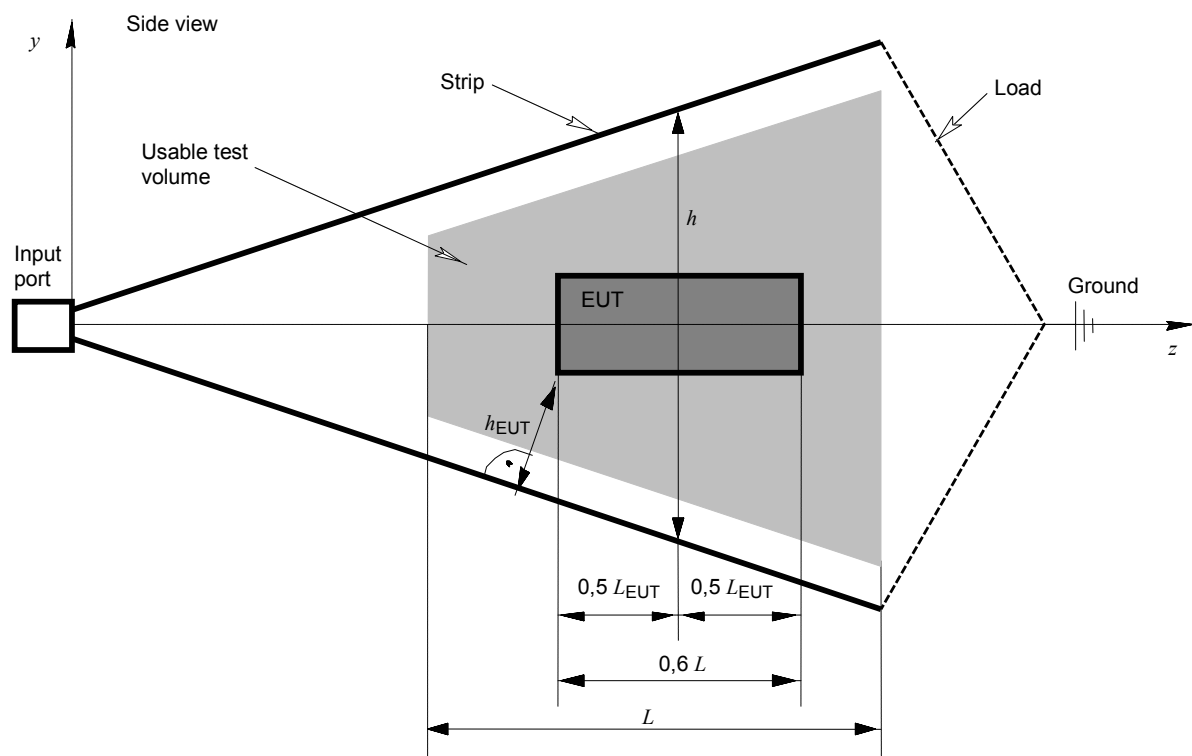


IEC 1941/10

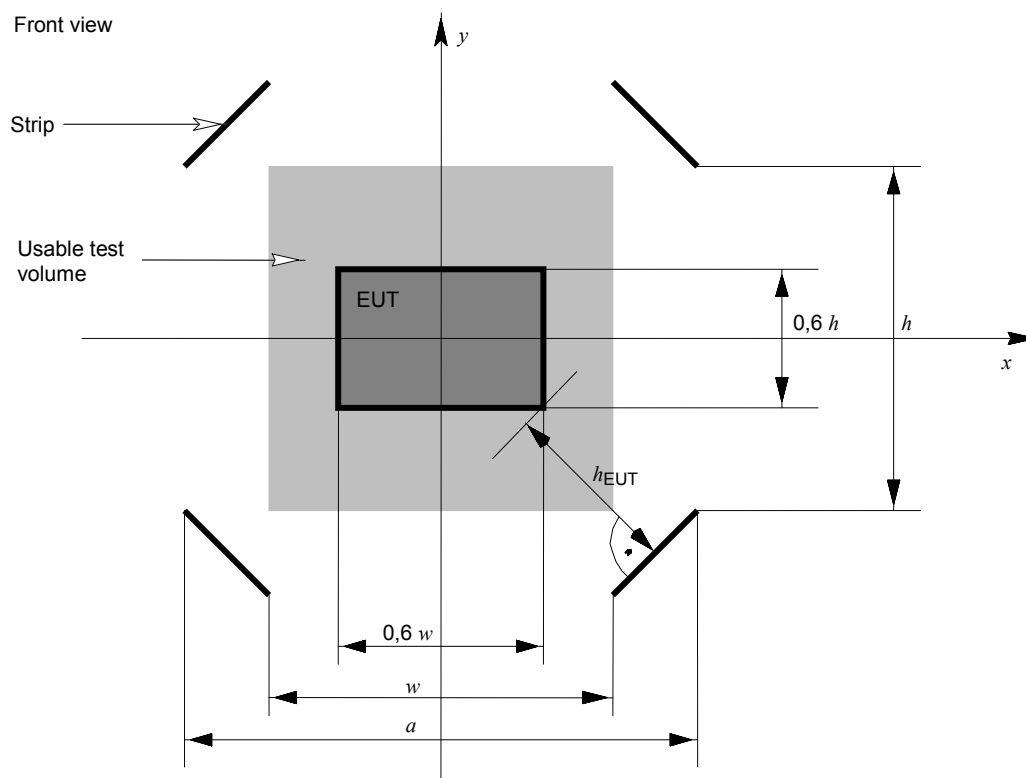
Figure A.8c – Cross-section view

NOTE h_{EUT} is the minimum distance between the EUT and each conductor or absorber of the waveguide

Figure A.8 – Stripline (two plates)



IEC 1942/10

Figure A.9a – Side view

IEC 1943/10

Figure A.9b – Cross-section view

NOTE The entire TEM waveguide configuration is surrounded by a fully anechoic enclosure. For symmetry purposes reasons the restriction of the maximum usable EUT height changes from $0,33 h$ to $0,6 h$ (see 5.2.2).

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

Annex B (normative)

Immunity testing in TEM waveguides

B.1 Overview

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

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

B.2 Test equipment

B.2.1 General

The following types of test equipment are recommended:

- TEM waveguide: of a size adequate to maintain a uniform field of sufficient dimensions to contain the intended equipment under test (EUT);
- electromagnetic interference (EMI) filters;
- RF signal generator(s): It is often useful to monitor the forward and backward power into the TEM waveguide when establishing field levels. A directional coupler along with a RF voltmeter or power meter allows the measurement of actual forward power to a TEM waveguide (as opposed to nominal power of the RF signal generator). Both shall cover the intended bandwidth.
- power amplifiers;
- field sensors, capable of separately monitoring the electric field along all three orthogonal axes. Any probe-head and opto-electronics circuitry shall have adequate immunity to the field strength to be measured and a fibre-optic link to the indicator outside the TEM waveguide. An adequately filtered signal line may also be used. TEM waveguides require a field probe that allows the electric field to be measured individually along all three orthogonal axes. If a small single-axis antenna is used, it shall be repositioned to measure each field component separately;
- associated equipment to record the power levels.

B.2.2 Description of the test facility

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

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

B.2.3 Validation of field uniformity

According to NOTE 2 and NOTE 3 of 5.2.3.1, the validation is carried out for a rectangular plane and at least 5 measurement points (4 at the corners and one at the centre). The uniformity is given if Equation (5) with the standard deviation according to Equation (6) is fulfilled for

- a) 75 % of the measured field strength E_i which are the magnitude of the primary electric field component over the defined area shall fulfil the following equation:

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + 2 \cdot K \cdot \sigma_E^-$$

NOTE 1 E_{Limit} is the limit given from the standard.

NOTE 2 According to Table 1 from 5.2.3 K is chosen to 1,15 for 75 %.

NOTE 3 If $2 \cdot K \cdot \sigma_E^-$ must be smaller than 6 dB, the standard deviation is calculated following Equation (6) from 5.2.3 as follows:

$$\begin{matrix} 0 \\ +6 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} \leq 2,61 \quad \text{in dB}$$

NOTE 4 If the 75 % interval is set to 10 dB, the acceptable standard deviation is

$$\begin{matrix} 0 \\ +10 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{10}{2 \cdot 1,15} \leq 4,34 \quad \text{in dB}$$

- b) the magnitudes of both secondary (unintended) electric field components are at least 6 dB less than the primary component. A given percentage of these measured relations have to fulfil the equation:

$$\frac{E_{\text{sec}_i}}{E_{\text{pri}_i}} \leq \left(\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \right)_{\text{dB}} + K \cdot \sigma_{\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}}} \leq \begin{cases} -6\text{dB} \\ -8\text{dB} \end{cases}$$

with K chosen according to Table 1 from 5.2.3.

The standard deviation for the set of measurements $\frac{E_{\text{sec}_i}}{E_{\text{pri}_i}}$ must fulfil the following equation:

$$\sigma_{\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}}} \leq \frac{1}{K} \left(\begin{matrix} -6\text{dB} \\ -2\text{dB} \end{matrix} - \left(\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \right)_{\text{dB}} \right)$$

A primary electric field component tolerance (see Equation (7) from 5.2.3) greater than $\begin{matrix} -0 \\ +6 \end{matrix}$ dB up to $\begin{matrix} -0 \\ +10 \end{matrix}$ dB, or a secondary electric field component level up to –2 dB of the primary field component, is allowed for a maximum percentage of test frequencies as defined in 5.2.1, provided that the actual tolerance and frequencies are stated in the test report.

NOTE 5 Following Equation (7) from 5.2.3 the standard deviations are calculated to

$$\begin{matrix} 0 \\ +6 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} = 2,61 \quad \text{and} \quad \begin{matrix} 0 \\ +10 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{10}{2 \cdot 1,15} = 4,34 \quad \text{in dB}$$

Table B.1 – Uniform area calibration points

Dimensions	Layout and number of measurement points
1,5 m × 1,5 m	4 × 4 = 16
1,0 m × 1,5 m	3 × 4 = 12
1,0 m × 1,0 m	3 × 3 = 9
0,5 m × 1,0 m	2 × 3 = 6
0,5 m × 0,5 m	4 + 1 (centre) = 5
0,25 m × 0,25 m	4 + 1 (centre) = 5

Areas not listed in Table B.1 shall be calibrated using a grid number defined by the smallest 0,5 m grid fully containing the proposed area. Grid spacing shall be uniform along each side. In the test set-up, the EUT shall have its face illuminated coincident with this plane (see Figure B.2).

EXAMPLE 1 A 20 cm × 20 cm area using 4 + 1 [centre] = 5 points, a 80 cm × 80 cm area using 3 × 3 = 9 points, and a 1,2 m × 0,6 m area using 4 × 3 = 12 points.

EXAMPLE 2 A 1,2 m × 0,6 m uniform area shall use a 0,4 m × 0,3 m basic cell size.

The requirement of a uniform area is based on the TEM mode verification method of 5.2.1. In principle, the field uniformity is verified in terms of the primary TEM mode field component. If the resultant field strength is used instead, all above-mentioned requirements have to be fulfilled, and it shall be shown that the requirements on the secondary components of 5.2.1 are fulfilled. Further information about field homogeneity is given in [17].

B.2.4 Test levels

The test levels are given for guidance in Table B.2.

Table B.2 – Test levels

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

B.2.5 Harmonics

Some TEM waveguides may have resonances at frequencies higher than the recommended upper useful frequency.

NOTE ISO 11452-3 requires the installation of a low-pass filter of at least 60 dB at frequencies above 1,5 times the cut-off frequency of the TEM waveguide.

B.3 Test set-up

B.3.1 Arrangement of table-top equipment

For TEM waveguides, rather than using a 0,8 m high non-conducting table as typical for some immunity test set-ups, the equipment is placed on a test set-up support (see 3.1.16) or

manipulator (see 3.1.21) of a proper shape and size such that the front face lies within the uniform field area in each position. A typical EUT set-up is shown in Figure B.1.

B.3.2 Arrangement of floor-standing equipment

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

B.3.3 Arrangement of wiring

Wiring is left exposed to the electromagnetic field for a distance of 1 m from the EUT and is routed above the floor, at either EUT level or along a diagonal in the xy -plane, to the exit point in the TEM waveguide outer conductor (TEM cell: wall, floor). Routing cable in the z -direction along the outer or inner conductor shall be avoided. Cables routed parallel to the inner or outer conductor of the TEM waveguide shall be spaced a minimum of 0,1 m away from the conductor. Exit cables are terminated by absorbing clamps (see A.5.2). The termination of the exit cable is placed at the borderline of the uniform area. For guidance on absorbing clamp characteristics, see the descriptions in CISPR 16-1-4.

B.4 Test procedures

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

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

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

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

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

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

B.5 Test results and test report

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

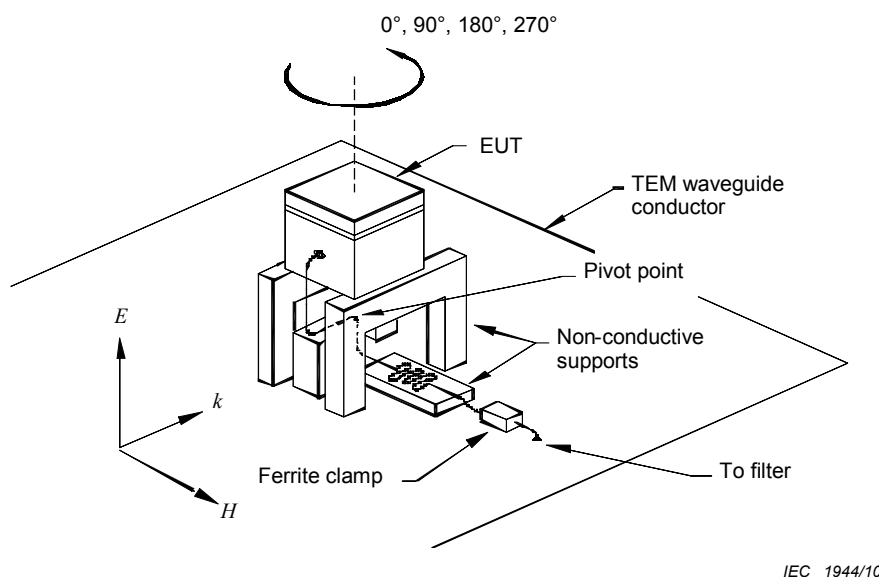


Figure B.1a – Vertical polarization

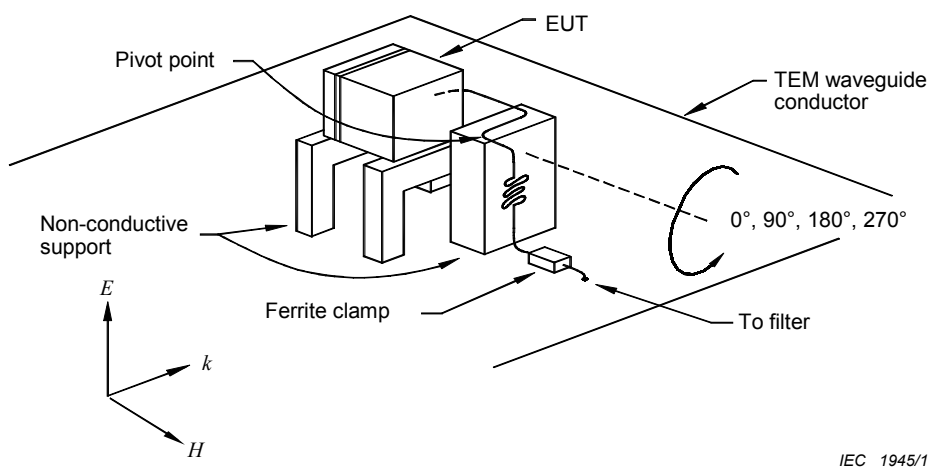


Figure B.1b – Horizontal polarization

Key

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

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

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

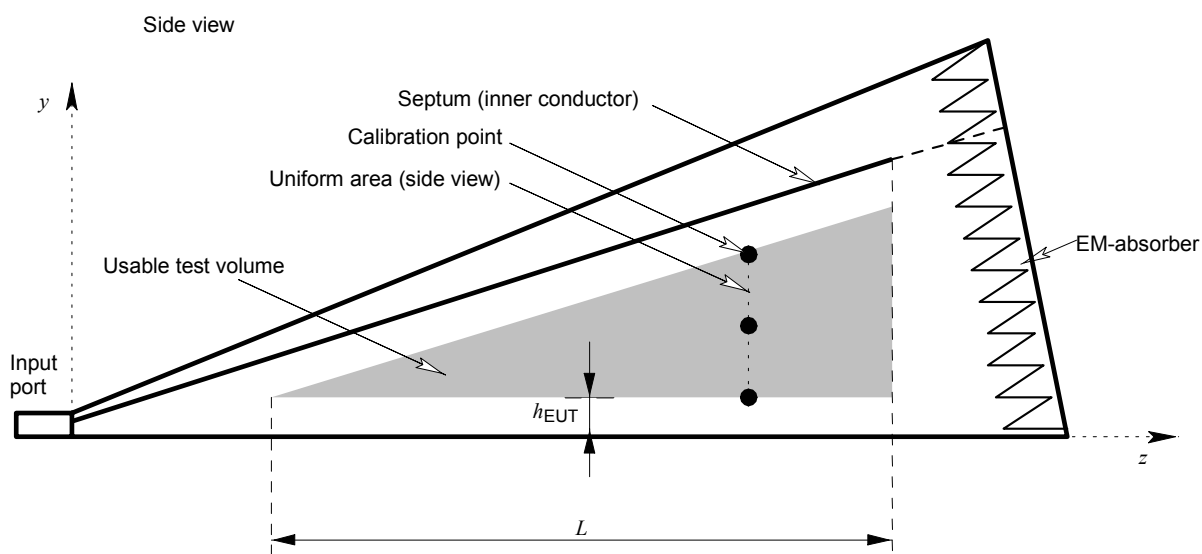


Figure B.2a – Side view

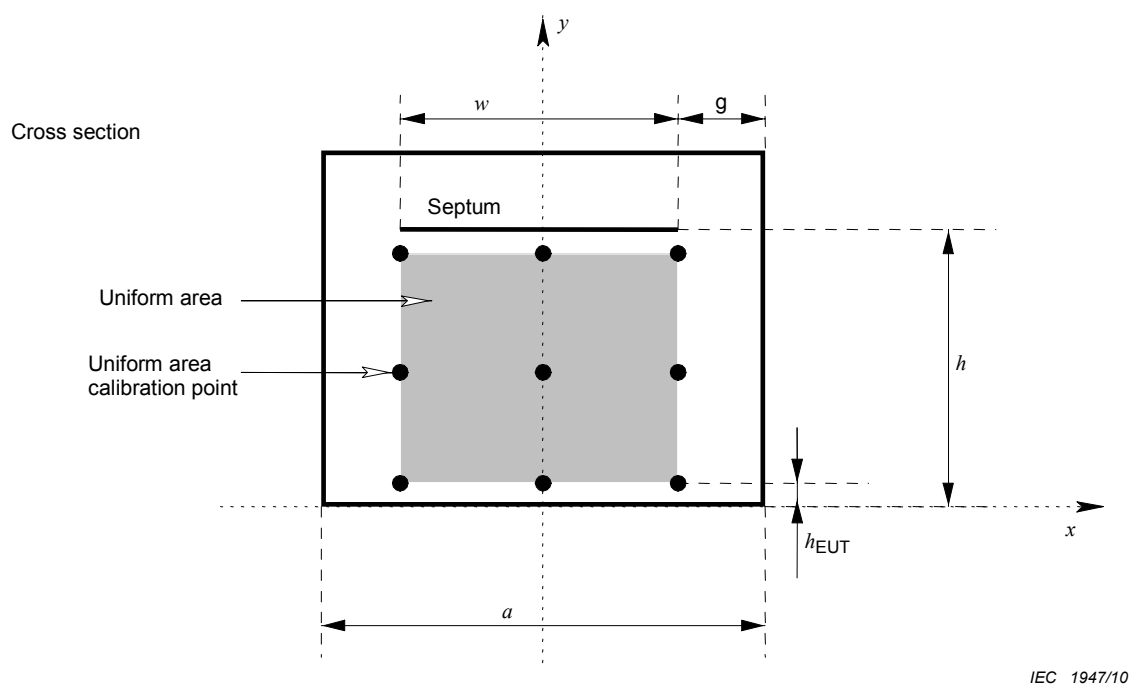


Figure B.2b – Cross-section view

NOTE Example for a uniform area with 3×3 calibration points in a GTEM cell according to B.2.3. Figure B.2b shows the maximum possible size of the uniform area. The boundary of the uniform area (plane) is given by the outer calibration points. The calibration points cannot be outside the usable test volume (see 5.2.2 and Figures A.6 to A.9).

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

Annex C (normative)

HEMP transient testing in TEM waveguides

C.1 Overview

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

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

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

C.2 Immunity tests

C.2.1 General

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

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

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

where

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

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

$$k = 1,3;$$

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

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

t is the time, in s;

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

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

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

where f is the frequency, in Hz.

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

NOTE For additional details see [23].

C.2.2 Radiated test facilities

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

- the ratio of peak electric field to the peak magnetic field shall be equal to $\eta_0 = 377 \, \Omega \pm 50 \, \Omega$;
- the rise time between 10 % to 90 % of the peak value shall be $2,25 \, \text{ns} \pm 0,25 \, \text{ns}$;
- the electric field shall be continuously increasing during the 10 % to 90 % rise time;
- the pulse width (the time duration between points on the leading and trailing edges of the pulse at 50 % of E_{peak}) shall be $27,5 \, \text{ns} \pm 2,5 \, \text{ns}$;
- the magnitude of any pre-pulse of the electric field shall be equal to, or less than, 7 % of the magnitude of the peak field;
- electric field reflections from the terminator of the simulator shall be less than 10 % of the magnitude of the peak field;
- fluctuations in the smoothed frequency spectrum of the electric field at the centre of the test volume shall not be larger than $\pm 3 \, \text{dB}$ compared to the theoretical spectrum in the bandwidth between 100 kHz and 300 MHz;
- at the time of the peak value of the primary field, other secondary electromagnetic components (see 3.1.19) shall be smaller than 10 % of the peak value of the primary field. It is recognized that this requirement is more severe than that given in 5.2.1;
- the peak electric field shall be uniform in the test volume to within the following criteria: the peak electric field within the test volume shall be within the range of E_{peak} and $2 E_{\text{peak}}$ in the time domain;
- to evaluate the field tolerances, electric and magnetic field measurements at the centre and the eight corners of the test volume shall be performed in the absence of the EUT.

C.2.3 Frequency domain spectrum requirements

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

- a) the frequency spectrum shall be computed using a uniformly sampled transient waveform having 4096 samples between the starting time of $0 \, \mu\text{s}$ and the ending time of $2 \, \mu\text{s}$. A 4096-point complex-valued frequency spectrum shall be calculated using an FFT (fast Fourier transform) or a discrete Fourier transform (DFT) with a frequency sampling interval of $0,5 \, \text{MHz}$, and a maximum frequency of $1,0 \, \text{GHz}$;

- b) the frequency domain spectrum shall be smoothed using a five-point windowing average (i.e. the spectrum is to be averaged over a 2 MHz window);
- c) the resulting magnitude of the smoothed spectrum shall lie within the specified dB level of the spectrum of the specified waveform of Equation (C.2) and shown in Figure C.1.

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

C.3 Test equipment

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

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

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

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

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

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

C.4 Test set-up

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

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

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

C.5 Test procedure

C.5.1 General

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

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

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

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

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

Laboratory tests shall be conducted with the ambient environmental conditions identified in 7.2. On-site tests are not suitable for immunity acceptance tests, but these tests may be used to verify installed equipment immunity as well as system immunity. For on-site tests, ambient conditions described in 7.2 are desirable, but not required.

C.5.2 Severity level and test exposures

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

For radiated immunity tests, a severity level shall be specified. At least two test exposures shall be performed at each of the three test amplitudes for each orientation (see Clause B.4)

and major operational mode of the EUT. If a test facility is available that includes the capability of hyper-rotation (see [6]) for the EUT, the facility may be used for HEMP testing.

C.5.3 Test procedure

C.5.3.1 Test parameter measurements

The climate parameters defined in 7.2 shall be measured by the test operator and documented. The characteristics of the test facility consisting of a series of measurements of the electromagnetic field waveforms within the test volume without the EUT present shall be made available to the test operator. This information shall also include an evaluation that indicates that the requirements for the field uniformity and waveform characteristics stated in C.2.2 and C.2.3 have been met. A reference electric field measurement shall be recorded for each pulse of field illumination.

C.5.3.2 Radiated test procedure

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

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

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

C.5.3.3 Small radiated test facility

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

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

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

C.5.4 Test execution

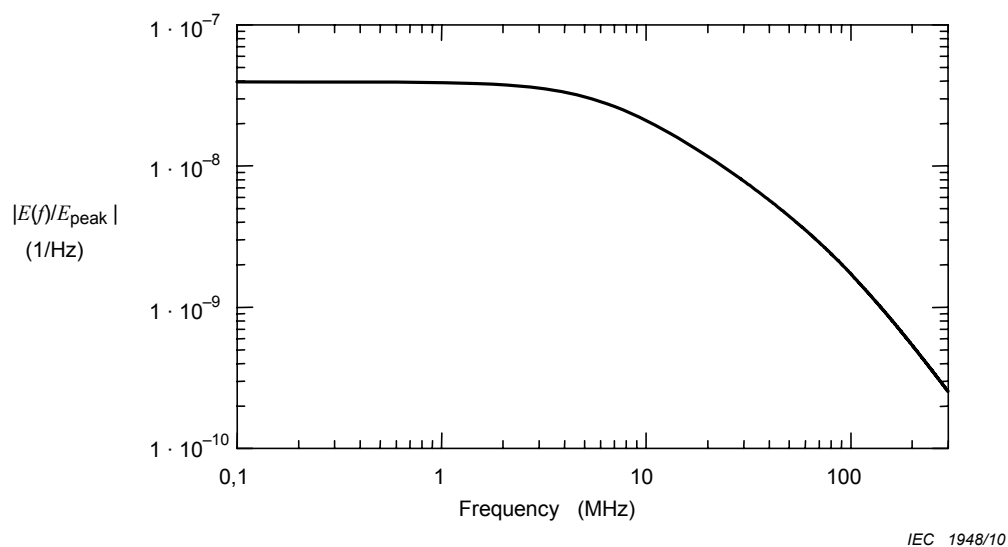
The test shall be performed in accordance with a test plan. Test exposures shall be applied when the EUT is in each of its major operating modes under normal operating condition, as defined in the test plan. For each test exposure level, the pulses shall be applied with sufficient time between pulses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

C.5.5 Execution of the radiated immunity test

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

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

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



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

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

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

Test level	Test required for equipment and systems with the following protection ^a	E-field peak value E_{peak}^b kV/m
R1	Concept 4	0,5
R2	Intermediate value	1
R3	Intermediate value	2
R4	Concepts 2A, 2B, 3	5
R5	Intermediate value	10
R6	Intermediate value	20
R7	Concepts 1A, 1B	50
RX	Special applications	X
^a The protection concepts are described in IEC 61000-5-3.		
^b According to IEC 61000-2-11, Table 2.		

Annex D (informative)

TEM waveguide characterization

D.1 Overview

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

D.2 Distinction between wave impedance and characteristic impedance

A TEM waveguide is a transmission line. The wave and characteristic impedances of a lossless transmission line are defined as follows in [33].

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

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

where

η is the wave impedance;

E_{ρ} is the transverse component of the electric field;

H_{ϕ} is the transverse component of the magnetic field;

μ is the permeability of the transmission line dielectric (typically air);

ε is the permittivity of the transmission line dielectric (typically air);

β is the propagation constant (real part);

ω is the radiant frequency.

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

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

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

where

Z_c is the characteristic impedance of the coaxial line;

V_0 is the voltage of the coaxial line;

I_0 is the current of the coaxial line;

E_{ρ} is the transverse component of the electric field;

H_{ϕ} is the transverse component of the magnetic field;

h $2h = r_i$, r_i : radius of inner conductor;

a $a = r_a$, r_a : radius of outer conductor.

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

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

D.3 TEM wave

D.3.1 General

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

D.3.2 Free-space TEM mode

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

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

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

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

The essential properties of the TEM mode are

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

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

D.3.3 Waveguide

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

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

D.4 Wave propagation

D.4.1 General

Wave propagation describes the shape of the equiphase lines and surfaces of the field.

D.4.2 Spherical propagation

This type of propagation is the most common one in free space far field. Normally it is caused by a point source like a single antenna. The field amplitude decreases with increasing distance to the source.

D.4.3 Plane wave propagation in free space

Very far away from an antenna, the wave front can be considered as planar. This kind of propagation will be observed within a parallel plate waveguide where the field amplitude is constant and independent of the distance to the source.

D.4.4 Velocity of propagation

The phase velocity of the TEM mode for propagation in free space and TEM waveguides is always equal to speed of light c_0 . It only depends on the permittivity ε and of the permeability μ of the space.

D.5 Polarization

D.5.1 Polarization vector

The electric field vector direction represents the polarization vector.

D.5.2 Linear and elliptic polarization

In general, the direction of the polarization vector changes with time. The curve traced out by the tip of the polarization vector, shown in Figure D.3, defines the type of polarization.

From [7] the shape of the polarization curve can be calculated by the following procedure. The transverse electric field vector is given by

$$\vec{E}_{tr}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} V_{-i} \cdot \vec{e}_{tr_i} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (\text{D.5})$$

The first term of the series represents the TEM mode, so a complex phasor can be written as

$$\vec{A}_{\text{TEM}} = V_{-1} \cdot \vec{e}_{tr_1} = V_{\text{TEM}} \cdot \vec{e}_{tr\text{TEM}} \quad (\text{D.6})$$

The phasor can be separated into its real and imaginary parts

$$\vec{A}_{\text{TEM}} = \vec{a}_r + j\vec{a}_i \quad (\text{D.7})$$

The vectors \vec{a}_r and \vec{a}_i define a fixed plane. In general the tip of vector \vec{E} moves in an ellipse. If \vec{a}_r and \vec{a}_i are parallel, \vec{E} moves on a fixed line. This case is called linearly polarized. Any individual modes are inherently linearly polarized. Only superposition with other modes results

in circular polarization. The intentional TEM mode for testing purposes in TEM waveguides is usually linearly polarized.

D.6 Types of TEM waveguides

D.6.1 General

The simplest version of a TEM waveguide is a two-conductor transmission line as shown in Figure D.5.

The complete transmission line may be divided into three sections.

a) Feed section

This is the port where a signal generator or receiver is connected to the TEM-waveguide.

b) TEM-waveguide section

Usually contains the test volume.

c) Termination section

Normally the termination represents an actual or equivalent resistor which is equal to the characteristic impedance of the transmission line (= TEM waveguide).

For most two-port TEM waveguides, the feed and termination sections are geometrically identical and therefore interchangeable. A coaxial connector is used at both ports. Some TEM waveguides are based on a balanced transmission-line system, in which case a BALUN transformer is needed.

Firstly, TEM waveguides can be classified into closed and open geometries. A TEM waveguide structure is called "closed" when one conductor fully surrounds the other conductor. In these cases, the outer conductor also acts as an electromagnetic shield.

Secondly, there are one-port and two-port waveguides. This classification defines the termination of a TEM waveguide. Normally the TEM waveguide is used under matched termination conditions. The simplest way to match a two-port TEM waveguide is to put a lumped termination equal to the characteristic impedance at one port. In this case, it is assumed that the TEM line geometry close to the ports (tapered section) is well designed for wide-band matching (see Figure D.4).

For a one-port TEM waveguide, the termination is made with distributed resistors and/or a combination of anechoic absorbers. This type of termination can be used up to several GHz in some geometries. Rather than a wide frequency range, a two-port TEM waveguide has the advantage of allowing measurements of reflected and transmitted powers at either port.

Septum conductors can either be single or multiple wires connected in parallel or single or multiple plates connected in parallel. For multiple conductor systems, the excitation amplitude and phase can be intentionally changed to vary the dominant polarization within the test volume.

The septum can be installed either symmetrically or asymmetrically with respect to the outer conductor. The advantage of an asymmetrical TEM waveguide is a larger test volume.

D.6.2 Open TEM waveguides (striplines, etc.)

A simple open TEM waveguide can be built using a plate installed over a conducting ground plane. A generator or receiver (typical impedance 50 Ω) is connected at one port, and the other port is matched to the transmission line characteristic impedance. A constant

voltage/current distribution along the structure is achieved with proper impedance matching. This geometry is called an open two-port TEM waveguide.

The main disadvantage of open waveguides is energy lost to radiation. This unwanted radiation can cause interference to the test equipment system. Particularly for continuous-wave immunity testing, a shielded room for the open waveguide is absolutely necessary.

D.6.3 Closed TEM waveguides (TEM cells)

The main advantage of the closed TEM waveguide configurations is the inherent shielding. All immunity tests can be performed without generating any disturbance to the environment. Another advantage is that the cell is an unbalanced system, so a BALUN is not needed. Lastly, in general a TEM waveguide has no low-frequency limit. For that reason, transient tests can be performed with closed TEM waveguides.

NOTE For a symmetrical-feed TEM waveguide, a low-frequency limitation may be introduced by the BALUN.

D.7 Frequency limitations

The operation of a TEM waveguide is predicated on the assumption that the TEM mode has an identical field structure to that of a plane wave in free space over a defined portion of the cross-section of the cell. Therefore, using a TEM waveguide in emission or immunity tests requires the propagation of the TEM mode over the useable frequency range.

For a given frequency within the operating range of the empty waveguide, the wave will encounter a cross-section of dimension that will allow propagating modes other than TEM to be established. For a given non-TEM mode, the point along the waveguide's length at which the mode can propagate is dependent on frequency, and moves back towards the feed point with increasing frequency. The lowest order non-TEM mode (typically TE_{10}) is able to propagate when one cross-sectional dimension of the waveguide exceeds one-half of the free-space wavelength at that frequency. Higher order modes are launched initially by mode conversion from the TEM mode. Energy conversion between two modes is caused by irregularities in the waveguide structure that can couple to both modes.

In practice, many open and closed TEM waveguides include some type of foam or ferrite anechoic absorbers to minimize or remove the higher order modes and non-propagating resonant field distributions. If installed in the proper locations with respect to the modal field distribution, TEM mode characteristics can be essentially preserved. Generally, with the proper combination of absorber loading and input/output conductor tapering, many TEM waveguides will operate in a TEM mode up to frequencies of several GHz or higher. Proper absorber placement is determined by the shapes of the input/output tapers and the test-volume section. The disadvantage for many TEM waveguides with absorber-lining in the test-volume section is that the field factor e_{0y} (see A.3.2.3.3) used in the emissions correlation algorithm can no longer be calculated analytically. This may lead to higher measurement uncertainties.

For any TEM waveguide with or without absorber, the valid frequency range shall be established using the methods described in this standard (see 5.2.1 and 5.3.2).

Further information about field homogeneity and resonant frequency are given in [17] and [19]. For TEM waveguides without absorber, resonant frequencies depend on the geometry of the TEM waveguide. In a two-port TEM cell they occur between a certain cross-section of the feeding section and of the termination section, called cut-off positions z_c . Each higher order mode has another cut-off position, depending on the mode-type. In between port and cut-off position the field mode is not able to propagate. A resonance occurs if the distance between the two cut-off positions is a multiple of the half wavelength. For symmetrical reasons the resonant field shall have a maximum or be zero in the middle of the cell at $z = z_{sym}$. The resonant frequencies of the field modes can be analytically calculated by

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\varepsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{n+1}{2} \cdot \pi - \arctan\left(\frac{K_3}{K_4}\right)}{z_{\text{sym}}} \right)^2 + k_c^2(z_{\text{sym}})} \quad (\text{D.8})$$

with $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ and $K_3, K_4 = f(z, a, k, k_c, J_V)$ and $k_c = f(z_c, a, \text{mode})$.

The constants K_1 to K_4 may be solved analytically. K_1 is chosen to 1. Therefore K_2 leads to 0. K_3 and K_4 can be written as:

$$\begin{pmatrix} K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \cos\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) & -\sin\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) \\ -\frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \sin\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) & \cos\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) \end{pmatrix} \quad (\text{D.9})$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{a' z_k} \cdot J_V(kz_k) \\ \frac{a' - 2va'}{2\sqrt{a' z_k}} \cdot J_V(kz_k) + \sqrt{a' z_k} \cdot J_{V-1}(kz_k) \end{pmatrix}$$

For details see [19].

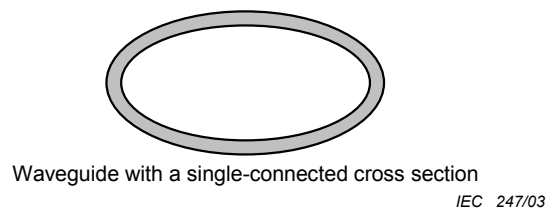


Figure D.1 – Simple waveguide (no TEM mode)

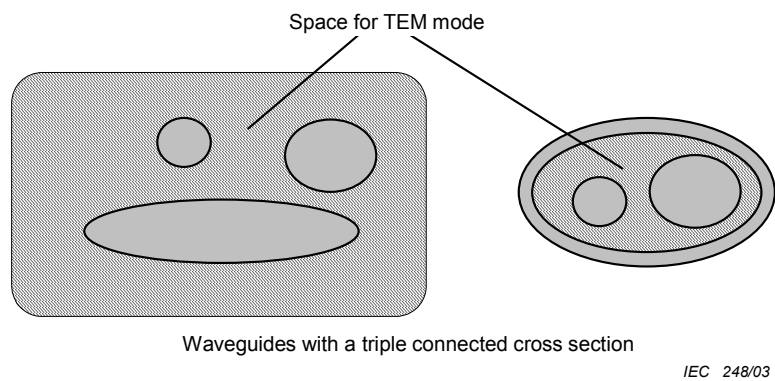


Figure D.2 – Example waveguides for TEM-mode propagation

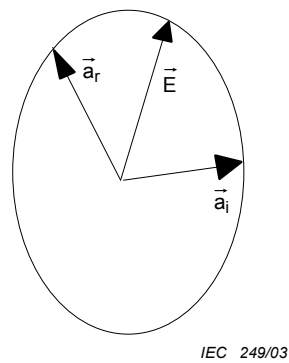


Figure D.3 – Polarization vector

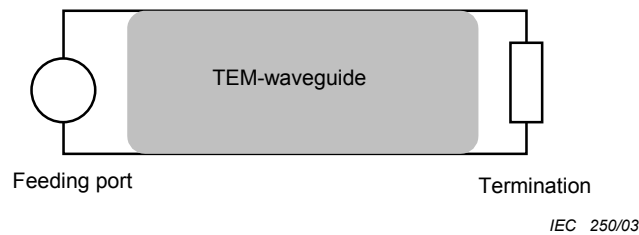


Figure D.4 – Transmission line model for TEM propagation

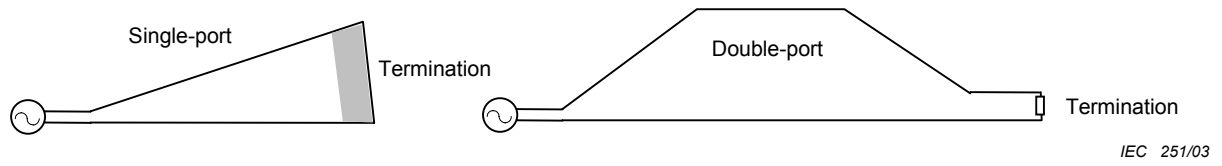


Figure D.5 – One- and two-port TEM waveguides

Annex E (informative)

Calibration method for E-field probes in TEM waveguides

E.1 Overview

E-field probes with broad frequency range and large dynamic response are extensively used in the field uniformity validation procedures in accordance with this standard. Among other aspects, the quality of the field probe calibration directly impacts the uncertainty budget of a radiated immunity test.

Generally, depending on the radiated immunity test performed, probes may be subject to field up to 200 V/m or even more, during the field uniformity validation in accordance with this standard. Therefore a calibration of the E-field probes used within this standard should take the intended frequency and dynamic ranges into consideration.

Currently probe calibration results show differences when the probe is calibrated in different calibration laboratories. Therefore, the environment and method for field probe calibration are to be specified. This annex gives the TEM waveguide validation procedures to be used for probe calibration and provides relevant information on calibration of probes to be used in this standard field uniformity measurements in order to limit these differences in validation results.

E.2 Probe calibration requirements

E.2.1 General

The calibration of E-Field probes intended to be used for uniform field area (UFA) validation procedures as defined in this standard should satisfy the following requirements. UFA is a hypothetical vertical plane of the field calibration in which variations are acceptably small.

E.2.2 Calibration frequency range

The frequency range should normally cover to the highest frequency that is specified by the size and the structure of the TEM waveguide. The largest dimension of probe head of an E-field probe, $l_{p\max}$, should be smaller than one quarter wavelength at the highest calibration frequency, $f_{c\max}$, to avoid approaching resonance. Therefore, the highest frequency is given by the dimension of the probe head as

$$f_{\max} \leq \frac{c_0}{4l_{p\max}} \quad (\text{E.1})$$

where, c_0 is the speed of the light.

For example, when the largest dimension of probe head of an E-field probe, $l_{p\max}$, is 2,5 cm, the highest frequency is given as 3 GHz from Equation (E.1). If the frequency exceeds the highest frequency that is determined by the TEM mode verification described in 5.2.1, the calibration is carried out up to the highest frequency determined by the TEM verification.

E.2.3 Calibration volume

The dimensions of the calibration volume, which should be as regular as possible, e.g. cubic or parallelepiped, should be smaller than 20% of the distance between the inner and outer conductors (septum height). The centre of the volume where an electric-field probe can be calibrated should be positioned in the centre of the septum height.

The validation of the volume should be performed at the grid points of the cube. A grid interval between two calibration points is selected at about 10 % of the septum height. An electric-field probe or sensor for the validation should be as small as possible. The probe or the sensor need not necessarily be calibrated.

NOTE 1 When the dimensions of the calibration volume are a 20 cm cube for example, the grid interval is 10 cm and the number of the measuring points is 27 as shown in Figure E.1.

The validation procedure of the volume is as follows:

- a) the electric fields are measured at all points using the constant forward power method mentioned in 5.2.3. Frequencies should be selected as mentioned in E.2.6;
- b) a standard deviation for the measured electric fields is calculated;
- c) the standard deviation should be smaller than about 1 dB for a one-port TEM waveguide, and 0,6 dB for a two-port TEM waveguide;

NOTE 2 The basis of these standard deviations is mentioned in [51].

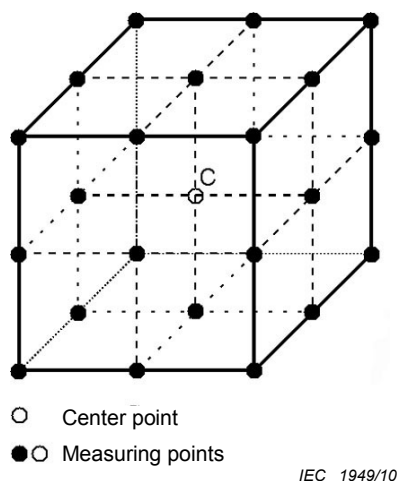


Figure E.1 – An example of the measurement points for the validation

E.2.4 Probe dimensions

The probe-head dimensions should be smaller than 10 % of the distance between the inner and outer conductors (septum height), h (see 5.2.3). The probe dimensions should also be smaller than the calibration volume (see E.2.3).

E.2.5 Perturbations of a TEM waveguide due to probe

The perturbation of a TEM waveguide due to probe including the measurement apparatus should be validated with and without the probe.

NOTE The perturbation depends not only on the perturbation caused by measurement apparatus but also the linearity of the TEM waveguide.

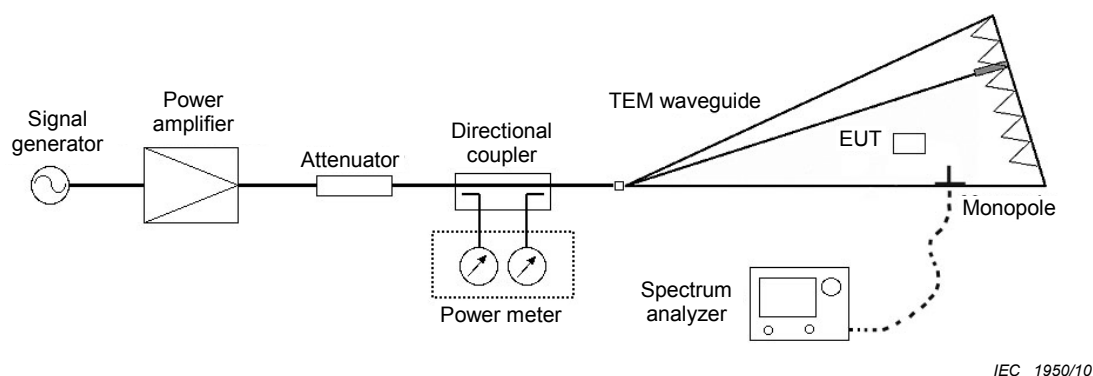


Figure E.2 – Setup for validation of perturbation

An example of the measurement setup for the validation is shown in Figure E.2. A power amplifier, a signal generator, a directional coupler, and a power meter should be connected to a TEM waveguide as in a case of the probe calibration. A monopole antenna is used for the sensing of the electric field. A small hole is made in the ground plate and then the antenna is attached to the ground plate. A less-invasive electric-field sensor, e.g. an optical electric-field sensor using LiNbO_3 electro-optic crystal, is also available instead of the monopole antenna. When the sensor is used, the hole is not needed. The antenna/sensor needs not necessarily be calibrated. The monopole antenna is connected to a spectrum analyzer to measure the antenna output. A metallic cube that has dimensions of the calibration volume can be used as a probe.

The validation procedure of the perturbation is as follows:

- set a frequency without an probe and apply the forward power to a TEM waveguide;
- measure the level of the power and the reading of the spectrum analyzer;
- increase the power and repeat b);
- change the frequency (see E.2.6) and repeat from a) to c);
- when the measurement is done for all frequencies, add the probe and repeat from a) to d);
- check the perturbation of the reading to the input power.

The difference between the perturbation with probe and that without probe should be less than the measurement uncertainty of the power meter and the spectrum analyzer.

NOTE See [52] and [53] to determine the uncertainty. Some manufacturers of measurement apparatus provide the measurement uncertainty of the apparatus.

E.2.6 Frequency steps

To be able to compare test results between different calibration laboratories, it is necessary to use fixed frequencies for the calibration, see Table E.1.

Table E.1 – Calibration frequencies

Frequency range	Typical calibration frequencies MHz
f_0 to 1 GHz	f_0 , 50, 100, 150, 200, ..., 950, 1 000
Above 1 GHz	1 000, 1 200, 1 400, ...
NOTE f_0 is the lowest frequency of the probe under calibration.	

E.2.7 Field strength

The field strength at which a probe is calibrated should be based on the field strength required for the immunity test. As the preferred method for uniformity field validation is carried out at field strength of at least 1,8 times the field strength to be applied to the EUT, it is recommended that the probe calibration is carried out at twice the test field strength, as shown in Table E.2.

NOTE This also covers the 1 dB compression requirement of the power amplifier.

Table E.2 – Calibration field strength level

Calibration level	Calibration field strength V/m
1	2
2	6
3	20
4	60
<i>X</i>	<i>Y</i>
NOTE <i>X</i> , <i>Y</i> is an open calibration level. This level may be given in the product specification or by the test laboratory.	

E.3 Requirements for calibration instrumentation

E.3.1 Specifications of TEM waveguide

A TEM waveguide can be used to establish standard fields for field probe calibrations. The field at the centre of a TEM cell between the septum and the top or bottom plate is calculated from:

$$E_{\text{approx}} = \frac{\sqrt{Z_0 P_{\text{net}}}}{h} \quad \text{in V/m} \quad (\text{E.2})$$

where

Z_0 is the characteristic impedance of the TEM cell (typically 50 Ω),

P_{net} is the net power in watts, determined according to E.3.4,

h is the separation distance between the septum and the top or bottom plate (in m).

NOTE 1 The field at the mid-point between two conductors is approximated by Equation (E.2).

NOTE 2 The Equation (E.2) is only valid for the TEM mode.

The VSWR of the TEM cell should be kept small, e.g. less than 1,3 to minimize the measurement uncertainties.

An alternative method of measuring P_{net} is to use a calibrated, low VSWR attenuator and power sensor connected to the output port of the TEM waveguide (two-port TEM waveguide only).

E.3.2 Harmonics and spurious signals

Any harmonics or spurious signals from power amplifiers should be at least 20 dB below the level at the carrier frequency. This is required for all field strength levels used during calibration and linearity check. Since the harmonic content of power amplifiers is usually worse at higher power levels, the harmonic measurement may be performed only at the highest calibration field strength. The harmonic measurement can be performed using a calibrated spectrum analyzer which is connected to the amplifier output through an attenuator, or through a directional coupler.

Calibration laboratories should perform a measurement to validate that the harmonic and/or spurious signals from the amplifier satisfy the requirements for all measurement setups. This may be done by connecting a spectrum analyzer to Port 3 of the directional coupler (replacing the power meter sensor with the spectrum analyzer input, see Figure E.3).

NOTE It should be assured that the power level does not exceed the maximum allowable input power of the spectrum analyzer. An attenuator may be used.

The frequency span should cover at least the third harmonic of the intended frequency. The validation measurement should be performed at the power level that will generate the highest intended field strength. Harmonic suppression filters may be used to improve the spectrum purity of the power amplifier(s).

NOTE “Intended frequency” means the maximum frequency to be calibrated.

E.3.3 Probe fixture

The probe fixture may cause reflections of electromagnetic fields during the probe calibration. The fixture should be made of a material with a relative permittivity of less than 1,2 and a dielectric loss $\tan \delta$ less than 0,005.

E.3.4 Measuring net power to a transmitting device using directional couplers

Net power delivered to a transmitting device can be measured with a 4-port bi-directional coupler, or two 3-port single directional couplers connected back-to-back (forming the so-called “dual directional coupler”). A common setup using a bi-directional coupler to measure the net power to a transmitting device is shown in Figure E.3. The forward coupling and reverse coupling are defined by the following equations in case where each port is connected with a matched load and a matched source:

$$C_{\text{fwd}} = \frac{P_3}{P_1} \quad (\text{E.3})$$

$$C_{\text{rev}} = \frac{P_4}{P_2} \quad (\text{E.4})$$

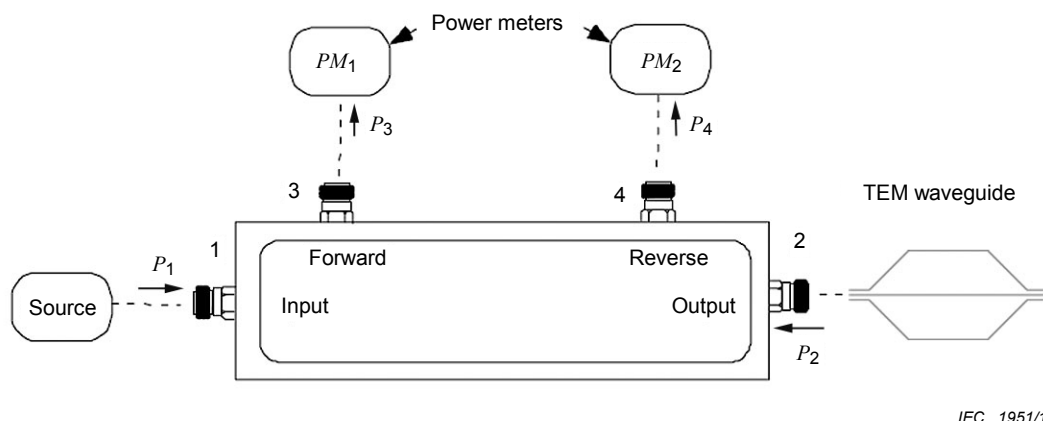
where P_1 , P_2 , P_3 , and P_4 are the respective powers at each port of the directional coupler.

The net power delivered to the transmitting device is then:

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1}{C_{\text{fwd}}} - \frac{PM_2}{C_{\text{rev}}} \quad (\text{E.5})$$

where PM_1 and PM_2 are the power meter readings in linear units.

Where the VSWR of the TEM waveguide is known, then a single three-port coupler can be used. For example, when the TEM waveguide has a VSWR of 1,5 this is equivalent to a voltage reflection coefficient (VRC) of 0,2.



IEC 1951/10

Figure E.3 – Setup for measuring net power to a transmitting device

The accuracy is affected by the directivity of the coupler. The directivity is a measure of the coupler's ability to isolate the forward and the reverse signals. For a well-matched transmitting device, the reverse power is much smaller than the forward power. The effect of the directivity is therefore less important than in a reflectivity application. For example, when the TEM waveguide has a VSWR of 1,5, and the coupler has a directivity of 20 dB, the absolute maximum uncertainty in the net power due to the finite directivity is 0,22 dB – 0,18 dB = 0,04 dB with a U-shaped distribution (where 0,22 dB is the loss of the incident power from VSWR 1,5).

The net power delivered to the transmitting device is then:

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1(1 - VCR^2)}{C_{\text{fwd}}} \quad (\text{E.6})$$

E.4 Field probe calibration

E.4.1 Calibration methods

Although three calibration methods are provided in [53], two methods are generally employed. The standard field method using calculated field strengths is used for a two-port TEM waveguide (see E.4.2). The calibration method using the transfer standard (i.e., a field sensor or probe similar to the one being calibrated) is used for a one-port TEM waveguide.

E.4.2 Calibration procedure in a case of two-port TEM waveguide

The standard field method can be applied for the probe calibration in a case of such waveguide. Figure E.4 shows an example of the setup for the calibration of an E-field probe. If the E-field level and the forward and reverse powers are read manually, a computer needs not necessarily be used. The calibration procedure should be selected according to the type of TEM waveguide. The procedure for carrying out the calibration in a case of two-port TEM waveguide is as follows:

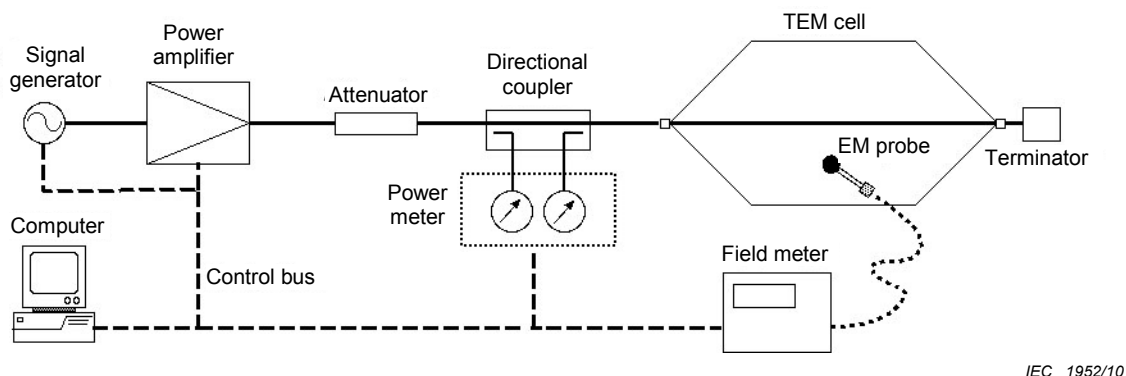
- position the isotropic electric field strength sensor at the centre of septum height;
- apply a forward power to the TEM waveguide input port so that the electric field strength of the primary field component is in the range 6 V/m to 20 V/m, through the frequency range specified in E.2.2 in frequency steps specified in E.2.6, and record all the forward and reverse powers, primary and secondary components field strength readings;
- calculate the net power, P_{net} , with Equation (E.5) or (E.6) and the measured powers;
- calculate the nominal primary electric-field strength with Equation (E.2) as E_{approx} .

NOTE The calibration factor may change depending on how the probe is installed. There also is a method to insert only a probe head from the upper part of TEM waveguide to remove the influence from any parts other than the probe head.

The calibration factor, F_p , can be obtained as

$$F_p = \frac{E_m}{E_{\text{approx}}}, \text{ or } F_p = E_m - E_{\text{approx}} \quad \text{in dB} \quad (\text{E.7})$$

where E_m is the measured primary field strength.



IEC 1952/10

Figure E.4 – Example of setup for calibration of E-field probe

E.4.3 Calibration procedure in a case of one-port TEM waveguide

E.4.3.1 Transfer method

Generally, deviations of the measured electric field strength from the field strength given by Equation (E.2) are within $\pm 0,5$ dB for all frequencies in a case of a two-port TEM waveguide. However, the deviations may be ± 3 dB or ± 4 dB in a case of one-port TEM waveguide. Therefore, the calibration method mentioned in E.4.2 should not be used in the one-port TEM waveguide. In that case, the calibration can be performed by using a transfer method.

A transfer probe can be used to establish standard fields in a field-generating device (working standard device). The transfer probe response can be either determined by theoretical computations (for probes such as dipoles) or by calibrations performed according to some methods (e.g. a three antenna method in an anechoic chamber can be used). Another method is the use of a small (to allow a high upper frequency) two-port-TEM-cell. That of course requires that the transfer probe is sufficiently small. Once the transfer function of the working standard device is known, probe calibration can be performed at other power levels provided that the working standard device is linear. Possible additional errors due to the difference in calibration environments (e.g. calibration site, size, orientation) for transfer standards as well as differences in shapes between the transfer standard and the probe under calibration should be noted.

NOTE 1 Usually, any difference between the calibration environment between the reference calibration and the actual use in a calibration laboratory will introduce systematic errors. Furthermore, the transfer standard used in a calibration laboratory should ideally have the same geometry and construct as the probe that is actually to be calibrated. If this is not the case additional systematic errors will be introduced that will have to be quantified.

The procedure for carrying out the calibration by using the transfer probe is as follows:

- position the transfer probe at the centre of septum height;
- apply a forward power to the TEM waveguide input port through the frequency range specified in E.2.2 in frequency steps specified in E.2.6, and record all the forward and reverse powers and the primary field strength readings (or the output voltage of the transfer probe);

NOTE 2 If the output voltages are measured, these should be converted to the electric field strength.

- c) calculate the net power, P_{net} , with Equation (E.5) or (E.6) and the measured powers;
- d) replace the transfer probe by the isotropic electric field strength sensor to be calibrated;
- e) apply a forward power so that the net power is the same as the power in b), and record the primary field strength readings.

The calibration factor, F_p , can be obtained as

$$F_p = \frac{E_m}{E_T}, \text{ or } F_p = E_m - E_T \text{ in dB} \quad (\text{E.8})$$

where E_T is the primary field strength obtained by the transfer probe.

The transfer method is accurate if the following conditions are met:

- the setup does not change between the transfer and calibration procedures;
- the probe position during measurements is reproduced;
- the transmitted power remains the same;
- the probe under test is similar in construction (size and element design) to the transfer probe;
- the cables connecting the sensor head and readout do not disturb or pick up the field;
- the working standard device is largely anechoic.

References [54] and [55] have more information on this method.

E.4.3.2 Method of electric field estimation at the calibration position

If the transfer probe is not available, a probe can be calibrated by another method. A monopole antenna mentioned in E.2.5 is used (see Figure E.5). The calibration procedure is as follows:

- a) position the monopole antenna at the ground plate;
- b) apply the forward power to the TEM waveguide input port through the frequency range specified in E.2.2 in frequency steps specified in E.2.6, and record all the forward and reverse powers, and the spectrum analyzer readings, P_{nmono} ;
- c) calculate the strength of the electric field at the position of the monopole, E_{mono} , using the antenna factor of the antenna;
- d) calculate the net power, P_{net} , with Equation (E.5) or (E.6) and the measured powers;
- e) remove the monopole, and then position the small electric field sensor (e.g. optical electric field sensor) at the place where the monopole had been positioned;
- f) apply a forward power so that the net power is the same as the power in a case of b), record the primary field strength or the spectrum analyzer readings by the sensor (E_M or P_M);

NOTE The small electric field sensor need not necessarily be calibrated. Although the electric field probe can be used, the probe to be calibrated should not be used.

- g) position the small electric field sensor at the position to be calibrated (normally, at the centre point of the septum height);
- h) apply a forward power so that the net power is the same as the power in a case of b), and record the primary field strength or the spectrum analyzer readings by the sensor (E_C or P_C).

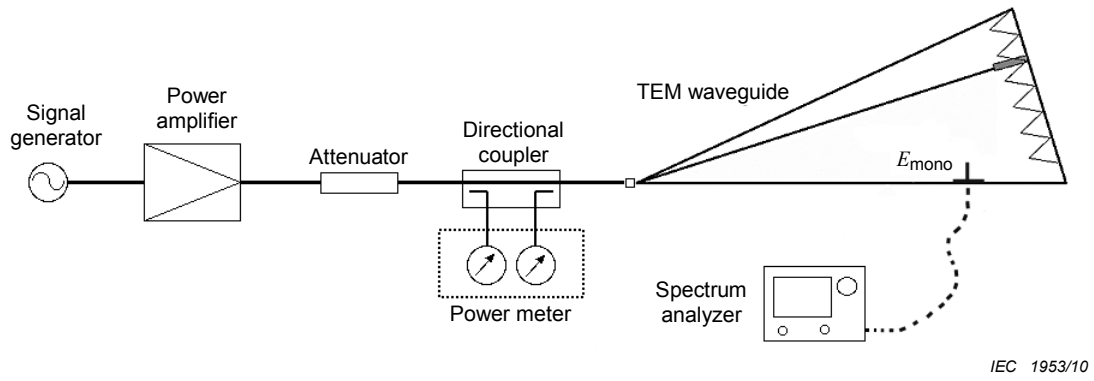


Figure E.5a – Use of a monopole antenna

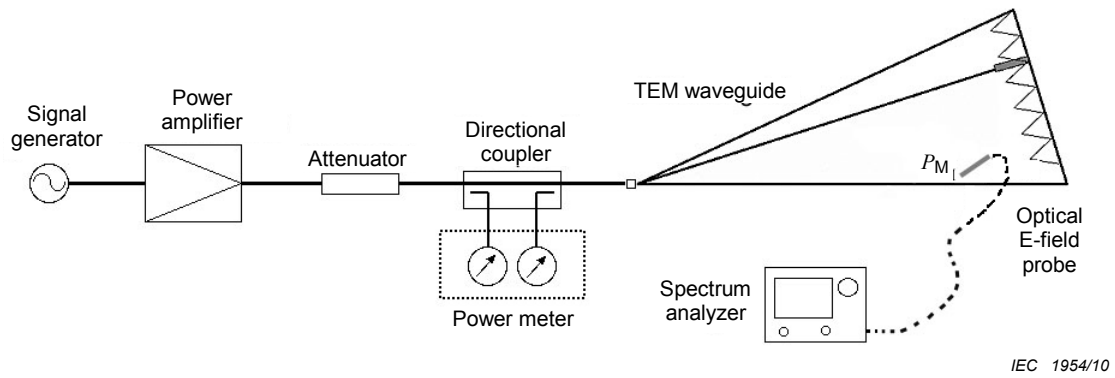


Figure E.5.b – Use of a small electric field sensor

Figure E.5 – Setup for calibration of E-field probe by another method

The reference electric field can be calculated as the following equation.

$$E_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{mono}} \sqrt{P_C}}{\sqrt{R_M}}$$

or

$$E_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{mono}} E_C}{E_M} \quad (\text{E.9})$$

The calibration factor, F_p , can be obtained as

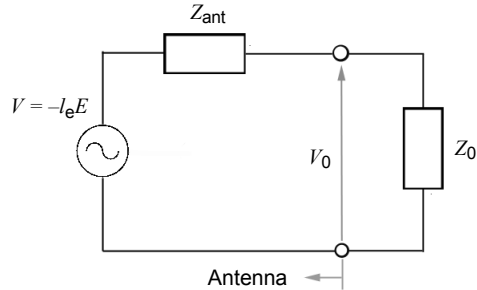
$$F_p = \frac{E_m}{E_{\text{ref}}}, \text{ or } F_p = E_m - E_{\text{ref}} \text{ in dB} \quad (\text{E.10})$$

where E_m is the primary field strength obtained by a probe under test.

The procedure of the antenna factor of the monopole antenna is stated in E.4.3.3.

E.4.3.3 Calculation of antenna factor from antenna impedance using equivalent length

Antenna impedance can be obtained by measuring the reflection coefficient of the antenna using a network analyzer, or by a calculation using the Labus's equation [56] or other numerical methods such as the method of moments.



IEC 1955/10

Figure E.6 – Equivalent circuit of antenna and measurement apparatus

The equivalent circuit of a receiving antenna and a measurement apparatus is shown in Figure E.6. The terminal voltage of the antenna, V_0 , is obtained as follows:

$$V_0 = \frac{Z_0 V}{Z_0 + Z_{\text{ant}}} = -\frac{Z_0 I_e E}{Z_0 + Z_{\text{ant}}} \quad (\text{E.11})$$

where

Z_0 and Z_{ant} are the characteristic impedance of the apparatus and the antenna impedance, respectively;

E is the electric field at the place where the element of the antenna is positioned.

l_e is the effective length of the antenna, which is calculated as follows:

$$l_e = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \int_0^l \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx = \frac{\lambda}{2\pi \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \quad \left(l \leq \frac{\lambda}{4} \right) \quad (\text{E.12})$$

$$l_e = \frac{\lambda}{2\pi} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \quad \left(\frac{\lambda}{4} \leq l < \frac{\lambda}{2} \right) \quad (\text{E.13})$$

where l and λ are the element length of the antenna and the wavelength, respectively.

The antenna factor, AF , is expressed by the electric field and the terminal voltage is indicated by the following equation.

$$AF = \frac{E}{V_0} \quad (\text{E.14})$$

The antenna factor is obtained from (E.11) and (E.14) as

$$AF = \frac{Z_0 + Z_{\text{ant}}}{Z_0 l_e} \quad (\text{E.15})$$

Bibliography

Standards including TEM waveguides

ANSI C63.4, *Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*

ANSI C63.19-2007, *Methods of Measurement of Compatibility between Wireless Communication Devices and Hearing Aids*

CISPR 20, *Sound and television broadcast receivers and associated equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement*

CISPR 25, *Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers*

EIA/TIA-631, *Telecommunications Telephone Terminal Equipment – Radio Frequency Immunity Requirements for Equipment Having an Acoustic Output*

ETSI TR 102 273-5, *Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Improvement on Radiated Methods of Measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties – Part 5: Striplines*

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

IEC 60118-13, *Electroacoustics – Hearing aids – Part 13: Electromagnetic compatibility (EMC)*

IEC 60489-1, *Methods of measurement for radio equipment used in the mobile services – Part 1: General definitions and standard conditions of measurement*

IEC 60489-3, *Methods of measurement for radio equipment used in the mobile services – Part 3: Receivers for A3E or F3E emissions*

IEC 61967-2, *Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 2: Measurement of radiated emission, TEM cell and wideband TEM cell method*

IEC 62132-2, *Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity – Part 2: Measurement of radiated immunity – TEM-cell and wideband TEM-cell method*

IEEE Std C95.3, *IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields – RF and microwave*

IEEE Std 1309-2005, *IEEE Standard for Calibration of electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*

IEEE Std 145-1993, *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*

IEEE Std 211-1997, *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation*

ISO 11452, (all parts), *Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy*

ISO 11452-3, *Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Part 3: Transverse electromagnetic mode (TEM) cell*

MIL-STD 461F, *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*

Reference documents

- [1] M. Alexander, A. Nothofer, R.C. Dixon, "The use of ferrite clamps and clip-on ferrites," CISPR/A-TC77 (JTF-TEM-Alexander-Nothofer-Dixon) 01-01, June 2001
- [2] ANSI C63.4-2008, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Dec. 2000
- [3] T.M. Babij, "Evaluation of errors in the calibration of TEM cells," *IEEE Miami Technicon* '87, Miami, FL, pp. 199-201, 1987
- [4] A. Beggio, G. Borio, and R.E. Zich, "On the unwanted effects on the radiated emission and susceptibility measurements due to the introduction of a wooden table," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp.252-255, May 1999
- [5] S. Bentz, "Use of the TEM cell for compliance testing of emission and immunity, an IEC perspective," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 43-47, 1996
- [6] H.S. Berger, and A. Tsaliovich, "Unlicensed PCS product EMC compliance measurement rational and alternatives," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 396-401, 1996
- [7] J. van Bladel, *Electromagnetic Fields*, Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [8] Ch. Braun, W. Graf, P. Guidi, H.U. Schmidt "Beeinflussung der Stromverteilung auf Testobjekten in TEM-Wellenleitern bei Variation des Füllfaktors," (translation: "Influence of current distribution on test objects in TEM waveguides for variable object size"), *Kleinheubach Symposium of URSI German NC and ITG*, Kleinheubacher Berichte, Deutsche Telekom, Darmstadt, Germany, vol. 39, 1996
- [9] E.L. Bronaugh, "Simplifying EMI immunity (susceptibility) tests in TEM cells," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, D.C., pp. 488-491, August 1990
- [10] E. Bronaugh, and J. Osburn, "Radiated emissions test performance of the GHz TEM cell," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, NJ, pp. 1-7, Aug. 1991
- [11] CISPR 14 (all parts), *Electromagnetic compatibility – Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus*
- [13] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., *IEEE Press*, Piscataway, NJ, 1991
- [14] M. Crawford, and J. Workman, "Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Baltimore, MD, pp. 80-85, 1980
- [15] H. Garbe, H. Haase, M. Koch, "Specification of alternative test sites with respect to given EMC field standards," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 459-464, Feb. 1997
- [16] J. Glimm, K. Münter, M. Spitzer, Th. Dötzer, Th. Schrader, "Influence of calibration and measurement techniques on the inhomogeneity of electromagnetic fields for immunity tests," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp. 600-603, May 1999

- [17] C. Groh, J.P. Kaerst, M. Koch, and H. Garbe, "TEM Waveguides for EMC measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 440-445, Nov. 1999
- [18] C. Groh, J.P. Kaerst, and H. Garbe, "Einfluss der Beladung auf die Feldmoden in TEM Wellenleitern," (translation: "Influence of load on field modes in TEM waveguides"), *Elektromagnetische Verträglichkeit EMV 2000 (8. Intl. Symp. and Exhb. on EMC)*, VDE Verlag, Berlin, Germany, pp. 287-294, Feb. 2000, ISBN 3-8007-2522-3
- [19] C. Groh, *TEM Zellen zur Kalibration von elektromagnetischen Feldsensoren*, (translation: *TEM cells for calibration of electromagnetic field probes*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, VDE Verlag, 2002
- [20] T.E. Harrington, Z. Chen, and M. D. Foegelle, "GTEM radiated emissions testing and FDTD modeling," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, pp. 770-775, 1999
- [21] T.E. Harrington, "Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, pp. 23-28, 2000
- [22] T.E. Harrington, and E.L. Bronaugh, "EUT directivity and other uncertainty considerations for GHz-range use of TEM waveguides," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, QC, Canada, pp. 117-122, 2001
- [23] IEC 61000-2-9, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance*
- [24] IEEE Std 1309-2005: *IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996
- [25] J.P. Kaerst, C. Groh, and H. Garbe, "Field mode properties of loaded waveguides," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 481-486, Feb. 2001
- [26] J.P. Kaerst, *Qualifikation beladener TEM Wellenleiter*, (translation: *Validation of loaded TEM waveguides*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, VDE Verlag, 2002
- [27] M. Klingler, J. Rioult, J.-P. Ghys, and S. Fichoux, "Wideband total radiated power measurements of electronic equipment in TEM and GTEM cells," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 665-670, 1999
- [28] M. Koch, *Analytische Feldberechnung in TEM Zellen*, (translation: *Analytical Field Calculation in TEM Cells*), PhD-thesis, University of Hannover, *Shaker-Verlag*, Aachen, Germany, 1999, ISBN 3-8265-6017-5
- [29] G. Koepke, and M. Ma, "A new method to quantify the radiation characteristics of an unknown interference source," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 35-40, March 1983
- [30] M. Ma, and G. Koepke, *Uncertainties in Extracting Radiation Parameters for an Unknown Interference Source Based on Power and Phase Measurements*, *National Institute of Standards and Technology* (NIST, formerly NBS), Technical Note 1064, June 1983
- [31] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson, "Uncertainties due to cross-polar coupling in GTEM cell emission measurement," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italy, pp. 590-595, 1998
- [32] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson: "Indirect measurements of field uniformity in TEM cells including cross-polar field components," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 659-664, March, 1999

- [33] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1998
- [34] T. Schrader, *Vergleich von Feldgeneratoren für EMV-Prüfungen*, (translation: *Comparison of Field Generators for EMC Tests*), PhD-thesis, University of Braunschweig, Germany, 1997
- [35] I. Sreenivasiah, D. Chang, and M. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 23, no. 3, pp. 113-121, Aug. 1981
- [36] E. Steinke, P. Wilson, and H. Garbe, "An equivalent "radiated emission" voltage measurement standard for TEM cells," *International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Poland, pp. 301-304, Sept. 1992
- [37] M.J. Thelberg, E.L. Bronaugh, and J.D.M. Osburn, "GTEM to OATS radiated emissions correlation from 1-5 GHz," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, IL, pp. 387-392, 1994
- [38] J. Tippet, and D. Chang, "Radiation characteristics of electrically small devices in a TEM transmission cell," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 18, no. 4, pp. 134-140, Nov. 1976
- [39] L. Turnbull, and A. Marvin, "A treatment of the phase properties of GTEM to open-area test-site correlation techniques," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 1, pp. 62-69, Feb. 1998
- [40] P. Wilson, D. Hansen, and D. Koenigstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," *IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, pp. 171-177, May 1989
- [41] P. Wilson, "On correlating TEM cell and OATS emission measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 1, pp. 1-16, Feb. 1995
- [42] IEC 61000-4-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*
- [43] CISPR/TR 16-4-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainties in standardized EMC tests*
- [44] CISPR 16-4-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainty in EMC measurements*
- [45] CISPR/TR 16-4-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-3: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistical considerations in the determination of EMC compliance of mass-produced products*
- [46] CISPR/TR 16-4-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistics of complaints and a model for the calculation of limits for the protection of radio services*
- [47] J. Glimm, K. Münter, R. Pape, T. Schrader, and M. Spitzer, "The New National Standard of EM Field Strength; Realisation and Dissemination", 12th Int. Symposium on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, Switzerland, ISBN 3-9521199-1-1, Page 611-613
- [48] H. Garn, M. Buchmayr, and W. Mullner, "Precise calibration of electric field sensors for radiated susceptibility testing", *Frequenz* 53 (1999) 9-10, Page 190-194

- [49] IEEE Standard 1309-2005, for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, 2005
 - [50] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM: 1995)*
 - [51] S. Ishigami and M. Hirata, “A New Calibration Method for an E-field Probe using TEM Waveguides”, The 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Zurich 2009), January 2009
 - [52] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISBN 92-67-10188-9, First Edition, 1993
 - [53] UKAS M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, Ed.2, 2007
 - [54] J. Glimm, K. Münter, R. Pape, T. Schrader, and M. Spitzer, “The New National Standard of EM Field Strength; Realisation and Dissemination”, 12th Int. Symposium on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, Switzerland, ISBN 3-9521199-1-1, Page 611-613
 - [55] H. Garn, M. Buchmayr, and W. Mullner, “Precise calibration of electric field sensors for radiated susceptibility testing”, Frequenz 53 (1999) 9-10, Page 190-194.
 - [56] J.Labus, “Rechnerische Ermittlung der Impedanz von Antennen. (Mathematical calculation of the impedance of antennas) Hochfrequenz und Elektroakustik, vol. 41, pp. 17-23; January, 1933
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	78
INTRODUCTION.....	80
1 Domaine d'application et objet.....	81
2 Références normatives	81
3 Termes, définitions et abréviations	82
3.1 Termes et définitions	82
3.2 Abréviations	86
4 Généralités.....	86
5 Exigences concernant les guides d'onde TEM	87
5.1 Généralités.....	87
5.2 Exigences générales pour l'utilisation des guides d'onde TEM	87
5.2.1 Vérification du mode TEM.....	87
5.2.2 Volume d'essai et taille maximale de l'EST	88
5.2.3 Validation du volume d'essai utilisable.....	89
5.3 Exigences et recommandations spéciales pour certains types de guides d'onde TEM.....	91
5.3.1 Montage de guides d'onde TEM ouverts	91
5.3.2 Autre vérification du mode TEM pour un guide d'onde TEM à deux accès.....	91
6 Vue d'ensemble des types d'EST	92
6.1 Généralités.....	92
6.2 EST de petite taille.....	92
6.3 EST de grande taille.....	92
7 Conditions d'essai en laboratoire.....	92
7.1 Généralités.....	92
7.2 Conditions climatiques	92
7.3 Conditions électromagnétiques.....	93
8 Evaluation et consignation des résultats d'essai	93
Annexe A (normative) Essais d'émission dans les guides d'onde TEM.....	94
Annexe B (normative) Essais d'immunité dans les guides d'onde TEM	114
Annexe C (normative) Essais de transitoires IEM-HA dans les guides d'onde TEM.....	121
Annexe D (informative) Caractérisation des guides d'onde TEM	128
Annexe E (informative) Méthode d'étalonnage pour les sondes de champ électrique dans les guides d'onde TEM	136
Bibliographie.....	147

Figure A.1 – Disposition du câble de sortie au coin à l'ortho-angle et au bord inférieur du volume d'essai.....	105
Figure A.2 – Positionneur d'ortho-axe ou manipulateur de base.....	107
Figure A.3 – Trois positions de rotation d'axe orthogonal pour les mesures d'émission.....	107
Figure A.4 – Orientations à 12 faces/axes pour un EST typique	108
Figure A.5 – Géométrie de l'emplacement d'essai en espace libre (OATS)	109
Figure A.6 – Cellule TEM à deux accès (septum symétrique).....	110
Figure A.7 – Cellule TEM à un accès (septum asymétrique).....	111
Figure A.8 – Ligne ouverte (deux plaques).....	112

Figure A.9 – Ligne ouverte (quatre plaques, alimentation équilibrée)	113
Figure B.1 – Exemple de montage d'essai pour guides d'onde TEM à polarisation unique	119
Figure B.2 – Points d'étalonnage de la zone uniforme dans un guide d'onde TEM	120
Figure C.1 – Amplitude spectrale dans le domaine de fréquences comprises entre 100 kHz et 300 MHz	127
Figure D.1 – Guide d'onde simple (pas de mode TEM)	134
Figure D.2 – Guides d'onde pour propagation en mode TEM	134
Figure D.3 – Vecteur polarisation	134
Figure D.4 – Modèle de ligne de transmission pour propagation TEM	134
Figure D.5 – Guides d'onde TEM à un ou deux accès	135
Figure E.1 – Exemple des points de mesure pour la validation	137
Figure E.2 – Montage de validation de la perturbation	138
Figure E.3 – Montage pour la mesure de la puissance nette vers un dispositif d'émission	141
Figure E.4 – Exemple de montage d'étalonnage d'une sonde de champ électrique	143
Figure E.5 – Montage d'étalonnage de la sonde de champ électrique à l'aide d'une autre méthode	145
Figure E.6 – Circuit équivalent de l'antenne et de l'appareil de mesure	146
Tableau 1 – Valeurs de K pour l'incertitude élargie pour des résultats à distribution normale	90
Tableau B.1 – Points d'étalonnage de la zone uniforme	116
Tableau B.2 – Niveaux d'essai	116
Tableau C.1 – Niveaux d'essai d'immunité aux perturbations rayonnées définis dans la présente norme	127
Tableau E.1 – Fréquences d'étalonnage	139
Tableau E.2 – Niveau de l'amplitude de champ d'étalonnage	139

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

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

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 61000-4-20 a été établie par le sous-comité 77B: Phénomènes haute fréquence, du comité d'études 77 de la CEI «Compatibilité électromagnétique», en collaboration avec le sous-comité A du CISPR (Comité international spécial des perturbations radioélectriques): Mesures des perturbations radioélectriques et méthodes statistiques.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2003 et son amendement 1 (2006) et constitue une révision technique.

Elle constitue la partie 4-20 de la CEI 61000 et a le statut de publication fondamentale en CEM conformément au Guide 107 de la CEI.

Les principaux changements par rapport à la première édition de la présente norme et à son amendement sont les suivants:

- amélioration de la cohérence des termes (par exemple essai, mesure, etc.);
- addition d'articles couvrant les considérations d'essai, les évaluations et le rapport d'essai;
- suppression des références aux guides d'onde TEM de grande taille;
- addition d'une nouvelle annexe informative dédiée à l'étalonnage des sondes de champ électrique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
77B/637/FDIS	77B/641/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.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61000, publiée sous le titre général *Compatibilité électromagnétique (CEM)*, figure sur le site web de la CEI.

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

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

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 relèvent pas de la responsabilité des comités de 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 sont et seront publiées avec le numéro de la partie suivi d'un tiret et complété d'un second chiffre identifiant la subdivision (exemple: CEI 61000-6-1).

La présente partie de la CEI 61000 est une norme internationale qui spécifie les exigences des essais d'émission, d'immunité et de transitoires IEM-HA.

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 matériels électriques et électroniques utilisant différents types de guides d'onde transverses électromagnétiques (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 matériels en essai (EST);
- les méthodes de validation des guides d'onde TEM pour les essais CEM;
- la définition de l'EST (c'est-à-dire l'armoire et le câblage de l'EST);
- les montages d'essai, les procédures et les exigences pour les essais d'émissions rayonnées dans les guides d'onde TEM, et
- les montages d'essai, les procédures et les exigences pour les essais d'immunité rayonnée dans les guides d'onde TEM.

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

Cette norme ne vise pas à spécifier les essais devant s'appliquer à des appareils ou systèmes particuliers. Le but principal de cette norme est de donner une référence de base d'ordre général à tous les comités de produits CEI concernés. Pour les essais d'émission rayonnée, il convient que les comités de produits sélectionnent des limites d'émission et des méthodes d'essai en consultation avec le CISPR. Pour les essais d'immunité rayonnée, les comités de produits restent responsables du choix approprié des essais d'immunité et des limites à appliquer aux matériels relevant de leur domaine d'application. Cette norme décrit des méthodes d'essai qui sont indépendantes de celles de la CEI 61000-4-3.¹

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).

¹ Ces autres méthodes distinctes peuvent être utilisées lorsqu'elles sont ainsi spécifiées par les comités de produits, en consultation avec le CISPR et le TC 77.

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

CEI 61000-2-11:1999, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-11: Environnement – Classification des environnements IEMN-HA.*

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*

CEI/TR 61000-4-32, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-32: Testing and measurement techniques – High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium*
Disponible en anglais seulement.

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

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

CISPR 16-1-4, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-4: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Antennes et emplacements d'essai pour les mesures des perturbations rayonnées*

CISPR 16-2-3:2006, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 2-3: Méthodes de mesure des perturbations et de l'immunité – Mesures des perturbations rayonnées*

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

3 Termes, définitions et abréviations

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins de ce document, les définitions données dans la CEI 60050(161), ainsi que les suivantes, s'appliquent.

3.1.1

mode électromagnétique transverse

TEM²

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 toute 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

² Transverse ElectroMagnetic.

3.1.3**cellule TEM**

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

3.1.4**guide d'onde TEM à deux accès**

guide d'onde TEM dont les deux extrémités comportent des accès d'entrée/sortie

3.1.5**guide d'onde TEM à un accès**

guide d'onde TEM avec accès unique d'entrée/sortie

NOTE De tels guides d'onde TEM présentent généralement une terminaison de ligne de transmission à large bande à l'extrémité de l'accès ne servant pas à la mesure.

3.1.6**ligne ouverte**

ligne de transmission avec terminaison 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

NOTE Généralement, les lignes ouvertes comportent des côtés ouverts pour l'accès et la surveillance de l'EST.

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, et qui 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, et qui ne dépend pas des amplitudes tension/courant, mais qui dépend en revanche de la seule géométrie de section de la ligne de transmission

NOTE 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, ou sinon de réduire, le niveau d'énergie électromagnétique réfléchi par ce matériau

3.1.11**terminaison de ligne de transmission à large bande****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'amplitude de champ d'emplacements d'essai en espace libre (OATS), en chambre semi-anéchoïque (SAC), ou en niveaux d'amplitude de champ en espace libre

3.1.13

type d'EST

groupe 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'EST aux matériels externes au guide d'onde TEM ou au câble qui sort du volume d'essai utilisable

NOTE Le volume d'essai est spécifié en 5.2.2.

3.1.15

câble d'interconnexion

câble qui relie des sous-composants de l'EST 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'EST comme celles exigées par un algorithme de corrélation ou un protocole d'essai

NOTE La mousse de polystyrène constitue un matériau type. Les supports en bois ne sont pas recommandés (voir [4]³).

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°

NOTE 1 La Figure A.2a montre un diagramme de l'ortho-angle.

NOTE 2 Lorsqu'il est associé à l'EST, 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 Dans les cellules TEM conventionnelles à deux accès, 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 Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

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 de support du montage d'essai 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 EST fixé

NOTE Un exemple de manipulateur est illustré à 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

NOTE Des détails supplémentaires sont donnés en [6].

3.1.23**dépendant/indépendant de la gravité**

la force de gravitation de la Terre a une direction fixe. L'EST peut tourner autour des trois axes. A cause des positions de rotation différentes, l'EST est influencé dans des directions différentes par la force de gravitation. L'EST 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'EST. L'EST est dépendant de la gravité s'il ne fonctionne pas correctement dans une ou plusieurs positions d'essai

3.2 Abréviations

BALUN	Symétriseur ⁴
DFT	Transformée de Fourier discrète ⁵
EST	Matériel en essai
FFT	Transformée de Fourier rapide ⁶
GTEM	Electromagnétique transverse gigahertz ⁷
IEM-HA	Impulsion Électromagnétique à Haute Altitude ⁸
OATS	Emplacement d'essai en espace libre ⁹
PoE	Points d'entrée ¹⁰
RF	Radiofréquence
SAC	Chambre semi-anéchoïque ¹¹
SPD	Parafoudre ¹²
TDR	Réfectomètre temporel ¹³
TE	Transverse électrique (mode), (mode H)
TEM	Mode électromagnétique transverse ¹⁴
TM	Transverse magnétique (mode), (mode E)
ROS	Rapport d'Onde Stationnaire

4 Généralités

Cette norme décrit les caractéristiques fondamentales et les limitations des guides d'onde TEM, essentiellement le volume d'essai, l'uniformité de champ, la pureté du mode TEM et les gammes de fréquences. Différentes caractéristiques d'ordre général 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 (SAC), qui fournissent des résultats de mesure valables et reproductibles du champ perturbateur provenant des matériels. 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.

⁴ BALanced-to-UNbalanced transformer

⁵ Discrete Fourier Transform

⁶ Fast Fourier Transform

⁷ Gigahertz Transverse ElectroMagnetic

⁸ High-altitude ElectroMagnetic Pulse (HEMP)

⁹ Open-Area Test Site

¹⁰ Points of Entry

¹¹ Semi-Anechoic Chamber

¹² Surge Protective Device

¹³ Time-Domain Reflectometer

¹⁴ Transverse ElectroMagnetic

Les guides d'onde TEM peuvent également être utilisés comme générateurs de champs pour les essais d'immunité des matériels aux champs électromagnétiques. Des précisions sont données à l'Annexe B. L'essai d'immunité dans les guides d'onde TEM est cité dans plusieurs autres normes dont la liste est donnée à la Bibliographie. Les propriétés de génération de champs peuvent également être utilisées pour mesurer l'amplitude de champ, voir l'Annexe E et les autres publications énumérées dans la Bibliographie.

Les essais avec les guides d'onde TEM ne sont pas limités aux mesures des perturbations rayonnées sur des matériels complètement assemblés. Ils peuvent également être appliqués aux essais des composants, des circuits intégrés et d'efficacité de blindage des matériaux des joints d'étanchéité et des câbles. Pour plus d'informations, voir la Bibliographie.

5 Exigences concernant les guides d'onde TEM

5.1 Généralités

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

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 A, B et C respectivement.

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

5.2.1 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. Cette vérification du mode TEM s'applique aux guides d'onde utilisés soit pour les essais d'immunité, soit pour les essais d'émission. Le comportement en mode TEM doit être confirmé à intervalles réguliers (voir 5.2.3).

NOTE 1 Généralement, il convient qu'un fabricant de guide d'onde TEM vérifie et donne des indications concernant le comportement en mode TEM sur la gamme de fréquences voulue, et il convient qu'il inclue les données de vérification dans la documentation du système.

En utilisant une procédure de vérification à zone uniforme du type de celles utilisées pour l'immunité (conforme à 5.2.3), 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 allant jusqu'à -0_{+10} dB, ou un niveau de composante de champ électrique secondaire atteignant jusqu'à -2 dB de la composante de champ primaire, est autorisée pour un pourcentage maximal de 5 % des fréquences d'essai (au moins une fréquence) sous réserve que la tolérance et les fréquences réelles soient indiquées 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.

NOTE 2 Le champ TEM est le mode dominant et les cavités correspondent à des valeurs Q peu élevées. Par conséquent, les résonances ne doivent pas être étroites. Pour cette raison, il est admis d'utiliser les fréquences logarithmiques pour la vérification du mode TEM.

NOTE 3 Pour les essais de transitoires, il convient que la fréquence de départ soit de 100 kHz.

NOTE 4 Le critère de 6 dB défini en 5.2.1 spécifie le mode TEM fondamental et non l'uniformité de champ. Il est par ailleurs distinct et ne sera pas confondu avec les exigences d'uniformité du champ spécifiées en 5.2.3. Des informations supplémentaires concernant l'uniformité de champ sont données en [17].

5.2.2 Volume d'essai et taille maximale de l'EST

La taille maximale d'un EST 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 les Figures A.6 à A.9) dépend de la «zone uniforme» telle qu'elle est définie au 5.2.3. La direction de propagation du mode TEM du guide d'onde (normalement l'axe z) est perpendiculaire à la zone uniforme (plan 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 5.2.3. La valeur minimale pour la distance h_{EST} entre l'EST et chaque conducteur ou absorbant du guide d'onde (voir les Figures A.6 à A.9) est donnée par la distance entre la limite de la zone uniforme (voir 5.2.3) et le conducteur. Cependant, il convient que la distance h_{EST} ne soit pas nulle pour éviter l'éventuelle modification de la condition de fonctionnement de l'EST par le couplage proche entre l'EST et des conducteurs du guide d'onde (recommandation: il convient que h_{EST} 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 $L = z_{max} - z_{min}$. Les exigences concernant une zone uniforme doivent être validées pour des sections pour chaque z où $z_{min} \leq z \leq z_{max}$. Il peut être supposé que les exigences de mode TEM sont satisfaites pour $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ dans les conditions suivantes:

- si les exigences du mode TEM sont satisfaites à la position z_{max} et si 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 si 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'EST est liée à la taille du «volume d'essai utilisable». Il doit être vérifié que l'EST n'est pas d'une taille supérieure à $0,6 w$ fois $0,6 L$ (voir les Figures A.6 à A.9).

NOTE 1 La série ISO 11452 recommande une taille de l'EST de $0,33 w \times 0,6 L$ et la MIL-STD 462F recommande $0,5 w \times 0,5 L$.

Il est recommandé que la hauteur maximale utilisable de l'EST soit de $0,33 h$, avec h égal à la distance entre les conducteurs intérieur et extérieur (espacement entre conducteurs) au centre de l'EST 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'EST 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'EST à $0,33 h$. La plupart des fiches techniques provenant des fournisseurs de cellules TEM limitent la hauteur de l'EST à un maximum de $0,5 h$. Sauf pour les étalonnages de haute précision, comme pour les sondes et les capteurs de champ, la hauteur de l'EST peut dépasser $0,33 h$, mais il convient qu'elle ne dépasse pas les recommandations du fabricant. La hauteur maximale utilisable de l'EST peut être supérieure à $0,33 h$ si le fabricant fournit des informations concernant l'incertitude de mesure pour des EST de plus grande taille. Des informations supplémentaires concernant les effets des guides d'onde chargés sont données en [25].

5.2.3 Validation du volume d'essai utilisable

5.2.3.1 Considérations d'ordre général

Ce paragraphe utilise le concept de «zone uniforme» qui est une zone hypothétique dans laquelle les variations de l'amplitude du champ acceptables sont faibles (voir [15]). Les dimensions du guide d'onde TEM déterminent la taille de cette zone uniforme (plane), à moins que l'EST ne puisse être complètement éclairé sur une surface plus faible. La taille maximale de l'EST est liée à la taille du «volume d'essai utilisable» (voir 5.2.2).

NOTE 1 En général, la forme exacte et l'emplacement de la zone uniforme ne sont pas spécifiés, mais ils sont déterminés en utilisant les procédures de la présente norme.

NOTE 2 En l'absence de toute autre définition, il convient que la zone uniforme soit un plan vertical orthogonal à la direction de propagation du champ. Il convient que cette zone soit une zone plane située devant l'EST.

NOTE 3 Le plan vertical part de l'hypothèse selon laquelle la direction de propagation du mode TEM est presque horizontale (alignée avec l'axe z) et une propagation des ondes lisses est fournie. Si la direction de propagation du mode TEM est dans une autre direction, le plan de zone uniforme peut être réorienté en conséquence.

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

En principe, la zone uniforme peut être située à toute distance de l'accès d'entrée; l'emplacement dépendra de la géométrie spécifique du guide d'onde. La zone uniforme est uniquement valable pour cette distance, à partir de l'accès d'entrée au niveau duquel elle est étalonnée. Pour permettre la rotation de l'EST, la zone uniforme doit être espacée d'une distance au moins supérieure à la plus grande dimension de l'enveloppe à partir de l'extrémité du volume d'essai utilisable z_{\max} défini au 5.2.2.

La zone uniforme est validée dans l'enveloppe vide, sur la gamme de fréquences et les paliers de fréquence spécifiés en 5.2.1 en utilisant un signal non modulé.

Selon la taille de la zone uniforme, la validation s'effectue à l'aide d'au moins 5 points de mesure (4 aux angles et un au centre). L'espacement entre deux points d'essai doit être inférieur à 50 cm. En cas de dépassement de la limite de 50 cm, une grille à espacement égal doit être utilisée pour les points d'essai. Cela signifie qu'on doit d'utiliser 9 points.

5.2.3.2 Uniformité du champ et méthode de mesure en mode TEM

La procédure de réalisation de la validation est connue comme la méthode «à puissance incidente constante» et comprend les étapes suivantes:

- a) positionner le capteur de champ électrique isotrope à l'un des points de la grille;
- b) appliquer une puissance incidente à l'accès d'entrée du guide d'onde TEM de manière à ce que le champ électrique de la composante de champ primaire soit compris dans la limite donnée E_{Limit} , sur toute la gamme de fréquences et les paliers de fréquence spécifiés en 5.2.1, et enregistrer toutes les valeurs lues de puissance incidente, et de champs de composantes primaires et secondaires;
- c) avec la même puissance incidente, mesurer et enregistrer les amplitudes de champs primaire et secondaire aux points restants de la grille;
- d) calculer l'écart-type selon l'Equation (1). Tous les résultats de mesurage sont exprimés en dB(V/m);
- e) l'amplitude de composante de champ primaire des points restants doit se situer dans une plage de 6 dB. Le niveau des composantes de champ secondaire ne doit pas dépasser -6 dB de la composante de champ primaire en chacun de ces points;
- f) parmi les points restants, prendre l'emplacement avec la composante de champ primaire la plus petite E_{ref} comme la référence (cela permet de s'assurer que l'exigence de $^{-0}_{+6}$ dB est satisfaite);

- g) la puissance incidente nécessaire pour l'intensité du champ d'essai exigée peut être calculée à partir de la connaissance de la puissance incidente et de l'intensité du champ en utilisant l'Equation (1), et doit être enregistrée.

$$P_{\text{test}} = \frac{E_{\text{test}}^2}{E_{\text{ref}}^2} P_{\text{fwd}} \text{ avec } E \text{ en V/m et } P \text{ en W} \quad (1)$$

EXEMPLE Si à un point donné, 81 W donne 9 V/m, alors 9 W est nécessaire pour 3 V/m.

Comme alternative, une procédure équivalente consiste à établir une amplitude de champ électrique constante de la composante primaire dans la gamme de la limite donnée E_{Limit} et à enregistrer la puissance incidente délivrée à l'accès d'entrée. Ensuite, les étapes des alinéas a), d), e), f) et g) doivent être appliquées. Cette méthode est connue comme la méthode d'«amplitude de champ constante».

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

5.2.3.3 Critères d'uniformité du champ

L'uniformité du champ est définie comme suit.

Au point d'essai i , l'amplitude du champ mesurée est donnée sous la forme E_i . La valeur moyenne et l'écart-type sont calculés pour les points d'essai N .

$$\text{Moyenne: } \bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{(N)} E_i \quad (2)$$

$$\text{Ecart-type: } \sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{(N)} (E_i - \bar{E})^2} \quad (3)$$

Au sens statistique, $N = 5$ reflète une très petite grandeur, une distribution normale des mesures E_i pouvant néanmoins être supposée. Pour avoir une probabilité de 75 % des résultats de mesurage qui relèvent de la largeur de bande

$$\bar{E} - K \cdot \sigma_E \leq E_i \leq \bar{E} + K \cdot \sigma_E \quad (4)$$

le facteur K choisi est égal à 1,15.

Tableau 1 – Valeurs de K pour l'incertitude élargie pour des résultats à distribution normale

Facteur K	1	1,15	1,3	1,5	2	3
Probabilité %	68,3	75,0	80,6	86,6	95,5	99,7

Avec des valeurs en dB, la probabilité doit souvent déterminer si la mesure E_i relève de la largeur de bande selon l'Equation (5).

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + E_{\text{Margin}} \quad (5)$$

La comparaison de cette largeur de bande avec l'Equation (4) donne l'Equation (6).

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + 2 \cdot K \cdot c_E^- \quad (6)$$

$$\sigma_E^- \leq \frac{\text{Marge}}{2 \cdot K} \quad (7)$$

Pour 75 % = $K = 1,15$ et une marge de 6 dB, l'écart-type doit être $\sigma_E^- \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} = 2,61$ dB.

La plus grande dimension du capteur doit être inférieure à 10 % de la distance séparant le conducteur intérieur et le conducteur extérieur. Dans ce cas, toute perturbation de champ peut être négligée. Des détails supplémentaires sont donnés en [18].

5.3 Exigences et recommandations spéciales pour certains types de guides d'onde TEM

5.3.1 Montage de guides d'onde TEM ouverts

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

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

Une distance minimale h correspondant à l'espacement d'une plaque est recommandée 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. Ces distances ne sont données qu'à titre indicatif. 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, l'autre plaque étant un septum installé.

NOTE 2 La MIL-STD 461F 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 par rapport à la taille du guide d'onde. La MIL-STD 462F RS105 exige une distance égale à $2h$ entre le plan métallique le plus proche, y compris le plafond, les murs du local blindé, etc., h étant la séparation verticale maximale des plaques. La CISPR 20 exige une distance minimale de 800 mm par rapport aux murs, au plancher et au plafond, correspondant à h .

5.3.2 Autre vérification du mode TEM pour un guide d'onde TEM à deux accès

Comme variante aux dispositions de 5.2.1, la gamme de fréquences utile d'un guide d'onde TEM à deux accès peut être établie en utilisant la méthode de vérification suivante.

Avant de soumettre l'EST, les résonances du guide d'onde TEM doivent être déterminées pour des dispositifs TEM à deux accès avec le montage d'essai et l'EST installés, l'EST n'étant pas sous tension. Dans ce cas, la perte de transmission du guide d'onde TEM dans la gamme de fréquences utile doit être

$$A_{\text{tloss}} = \left| 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{fwd}}} + \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{fwd}}} \right) \right| \leq 1 \text{ dB} \quad (8)$$

où

A_{tloss} est la perte de 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 incidente mesurée à l'accès d'entrée, en W;

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

NOTE 1 Les puissances réfléchie (en entrée), incidente et réfléchie (en sortie) sont mesurées par rapport à l'impédance caractéristique du guide d'onde TEM. On n'utilise pas de transformateur d'impédance. La puissance est uniquement mesurée «en ligne». L'Equation (8) 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.

6 Vue d'ensemble des types d'EST

6.1 Généralités

Un type d'EST 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'EST et sa configuration sont valables pour les essais d'immunité et d'émission pour permettre un montage uniforme dans le volume d'essai.

6.2 EST de petite taille

Un EST est défini comme un EST de petite taille 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'EST. Tous les autres EST sont définis comme des EST de grande taille.

6.3 EST de grande taille

Un EST est défini comme un EST de grande taille s'il s'agit

- d'un EST de petite taille avec un ou plusieurs câbles de sortie,
- d'un EST de petite taille avec un ou plusieurs câbles autres que de sortie connectés,
- d'un EST 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'EST de petites tailles disposés dans un montage d'essai avec des câbles d'interconnexion autres que de sortie, et avec ou sans câbles de sortie.

7 Conditions d'essai en laboratoire

7.1 Généralités

Afin de réduire au minimum l'effet des paramètres de l'environnement sur les résultats d'essai, l'essai doit être effectué dans des conditions de référence climatiques et électromagnétiques, comme spécifiées en 7.2 et 7.3.

7.2 Conditions climatiques

Sauf spécification contraire par le comité responsable de la norme générique ou de produit, les conditions climatiques à l'intérieur du laboratoire doivent se situer dans les limites éventuelles spécifiées pour le fonctionnement de l'EST et du matériel d'essai par leurs fabricants respectifs.

Les essais ne doivent pas être effectués si l'humidité relative est élevée au point de provoquer une condensation sur l'EST ou le matériel d'essai.

NOTE Lorsqu'il est considéré que l'on dispose de preuves suffisantes pour démontrer que les effets du phénomène couvert par la présente norme sont influencés par les conditions climatiques, il convient de porter cette information à l'attention du comité responsable de la présente norme.

7.3 Conditions électromagnétiques

Les conditions électromagnétiques du laboratoire doivent permettre de garantir le bon fonctionnement de l'EST afin de ne pas influencer les résultats d'essai.

8 Evaluation et consignation des résultats d'essai

L'essai doit être effectué selon un plan d'essai qui doit être inclus dans le rapport d'essai. Les résultats d'essai et les exigences de compte-rendu dépendent du type d'essai réalisé.

Le rapport d'essai doit contenir toutes les informations nécessaires pour reproduire l'essai. Les informations suivantes doivent notamment être consignées:

- les éléments spécifiés dans le plan d'essai;
- l'identification de l'EST et tout élément associé, par exemple marque, type de produit, numéro de série;
- l'identification du matériel d'essai, par exemple marque, type de produit, numéro de série;
- toutes conditions environnementales spéciales dans lesquelles l'essai a été effectué;
- toutes conditions spécifiques nécessaires pour pouvoir effectuer l'essai;
- le niveau de performances défini par le fabricant, le demandeur ou l'acheteur;
- pour l'immunité, le critère de performances spécifié dans la norme générique, de produit ou de famille de produits;
- les effets éventuels sur l'EST observés pendant ou après l'application de la perturbation de l'essai, et la durée pendant laquelle ces effets sont constants;
- pour l'immunité, les principes de justification de la décision d'acceptation/refus (basés sur le critère de performances spécifié dans la norme générique, de produit ou de famille de produits, ou convenus entre le fabricant et l'acheteur);
- les conditions d'utilisation spécifiques éventuelles, par exemple longueur ou type de câble, blindage ou mise à la masse, ou les conditions de fonctionnement de l'EST nécessaires à la mise en conformité;
- le schéma et/ou les illustrations du montage d'essai et de l'installation de l'EST.

Annexe A (normative)

Essais d'émission dans les guides d'onde TEM

A.1 Description générale

Cette annexe décrit les essais d'émission dans les guides d'onde TEM.

Les essais d'émission effectués dans les guides d'onde TEM peuvent être comparés aux limites déduites selon l'une des méthodes suivantes:

- **Limites de guides d'onde TEM**

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 décrit dans les références de la Bibliographie. Dans ce cas, les résultats d'essai pour les guides d'onde TEM sont utilisés pour être comparés 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]).

- **Limites OATS**

Cette approche est applicable aux EST qui doivent satisfaire aux limites de perturbation données en termes d'amplitude de champ OATS. Un algorithme de corrélation est utilisé pour déduire l'amplitude de champ OATS des essais de guides d'onde TEM.

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 afin de démontrer le caractère approprié du guide d'onde TEM qui est utilisé. Pour chaque type d'EST, une procédure de validation doit être effectuée comme décrit à l'Article 5. Dans les cas où seule une comparaison relative est réalisée à l'intérieur de la même famille de produits d'EST, 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 d'essai.

Les algorithmes de corrélation sont décrits à l'Article A.3. Les algorithmes de corrélation utilisent des mesures de tension en guide d'onde TEM pour estimer des amplitudes de champs OATS équivalentes. Des amplitudes de champs en espace libre peuvent également être estimées. Ces amplitudes de champs, ainsi que les résultats d'essai provenant de la procédure de validation du type d'EST, peuvent ensuite être comparés aux exigences des normes.

NOTE Les procédures d'essai exigent généralement que l'EST subisse une rotation dans les trois axes. 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'EST subit une rotation de $\pm 120^\circ$ autour de son axe vertical (qui est son ortho-axe). Il n'est pas nécessaire que l'EST subisse une rotation autour de son axe horizontal.

A.2 Matériel d'essai

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

NOTE Un capteur de champ isotrope peut être vu comme une antenne (voir la CISPR 16-1-4 pour les exigences relatives aux 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'essai d'émission en OATS. Les résultats des guides d'onde TEM sont convertis en données équivalentes de champ E OATS. Ce paragraphe décrit un algorithme fondé sur l'hypothèse selon laquelle la puissance rayonnée, telle que déduite d'une mesure par un guide d'onde TEM, sera rayonnée par un dipôle positionné au-dessus d'un plan de sol parfaitement conducteur.

Les routines de corrélation comprennent la distance entre l'EST et chaque conducteur, h_{EST} , et l'espacement entre conducteurs h (ou séparation des plaques) au centre de l'EST (voir les Figures A.6b et A.7b) dans le calcul. Les tensions mesurées avec l'EST placé dans le guide d'onde TEM sont générées par les émissions de l'EST. Après rotation (repositionnement) de l'EST conformément aux exigences de la routine de corrélation, des mesures de tension supplémentaires sont réalisées jusqu'à ce que toutes les positions exigées aient été vérifiées. La routine de corrélation utilise ensuite ces données pour simuler un essai OATS.

NOTE Des informations concernant la corrélation et les données de corrélation pour les mesures d'émission figurent en [5], [8], [17], [22], [34], [36], [40] et [41].

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

A.3.2 Algorithmes de corrélation

A.3.2.1 Généralités

Les deux paragraphes A.3.2.2 et A.3.2.3 montrent des approches de corrélation indépendantes. Le paragraphe A.3.2.2 décrit l'approche de base des routines de corrélation pour le «modèle multipôle». Il utilise un jeu d'essais dans les guides d'onde pour déterminer les moments multipolaires équivalents. Le paragraphe A.3.2.3 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.3.2.2 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), les premiers coefficients du développement des multipôles, en réalité des dipôles électriques et magnétiques, fournissent 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 tels un dipôle électrique et magnétique, la restriction de la taille rapportée à la longueur d'onde peut être assouplie.

L'approche de base des algorithmes de corrélation entre les guides d'onde TEM et l'emplacement d'essai en espace libre ou les données en espace libre, consiste à utiliser un jeu d'essais dans les 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. La méthode de base à trois orientations permet d'estimer la puissance rayonnée mais non les moments multipolaires individuels. Une fois la puissance rayonnée estimée, les champs rayonnés en espace libre ou sur un plan de sol infini peuvent être déduits 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 uniquement 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 tous les moments multipolaires rayonnent en phase. Ceci ne donne qu'une estimation de limite supérieure (voir [10], [28] et [39]). Des diagrammes de rayonnement détaillés ne peuvent pas être simulés. 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 essais d'émissions ont été montrées dans ces documents.

A.3.2.3 Algorithme de corrélation pour guide d'onde TEM à un accès

A.3.2.3.1 Généralités

L'algorithme 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'EST 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 EST sur un plan de sol fondé sur un modèle de dipôles parallèles (dipôle source et de réception) transmettant la même puissance totale.

A.3.2.3.2 Mesures de tension des guides d'onde TEM

Les tensions sont mesurées pour trois orientations de l'EST spécifiées 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'EST 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'EST. 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'EST: x' à y , y' à z , et z' à x . Ceci est équivalent à deux rotations de 90° de l'EST. La position c est obtenue par une permutation supplémentaire: x' à z , y' à x , z' à 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'EST est donnée par

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

où

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

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

et

V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} sont les mesures de tension à partir des trois positions de l'EST;

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'ondes, k_0 en $\frac{1}{\text{m}}$;

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120 \pi \Omega \approx 377 \Omega$ est l'impédance d'onde en espace libre, en Ω ;

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

e_{0_y} est le facteur de champ du mode TEM: la composante y normalisée du champ électrique à l'emplacement de l'EST (pour l'Equation (A.1): $(x = 0, y, z)$), en $\frac{\sqrt{\Omega}}{m}$.

NOTE Pour certains EST, il peut être nécessaire de soumettre trois orientations orthogonales à l'essai à chacune des quatre orientations de départ (orientations de départ a1, a2, a3 et a4 de la Figure A.4) pour un total de 12 orientations canoniques. La mesure de tension maximale et les mesures de tension réalisées à partir des deux orientations orthogonales correspondantes sont ensuite utilisées dans la méthode habituelle à trois orientations [21].

A.3.2.3.3 Détermination du facteur de champ

A.3.2.3.3.1 Généralités

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

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

A.3.2.3.3.2 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'EST avec une puissance d'entrée connue P_i en watts

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

A.3.2.3.3.3 Procédure analytique

Pour une cellule TEM de section rectangulaire tel qu'illustré en [41], une valeur approchée analytique de la composante de mode TEM normalisée peut être obtenue avec l'équation

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

où

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

a est la largeur de cellule (voir les Figures A.6 à A.9), à l'emplacement z , en m;

h est la hauteur du septum à l'emplacement z , en m;

g est la largeur d'espacement à l'emplacement z , en m;

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

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

Seuls quelques termes de cette série doivent être pris en compte pour une approximation correcte de e_{0y} . Les résultats du facteur de champ pour diverses géométries sont donnés en [28].

A.3.2.4 Corrélation avec un OATS

Les émissions de l'EST sur un plan de sol sont simulées en partant de l'hypothèse que la puissance totale rayonnée, telle qu'elle est estimée par les essais de guides d'onde TEM, est la même que celle émise par un dipôle (qui remplace l'EST).

Les équations relatives aux champs provenant d'un dipôle sont bien connues, et le plan de sol est pris en compte en introduisant un dipôle image. Les champs sont 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 donne alors l'amplitude de champ maximale 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

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

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

où

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

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

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi\Omega \approx 377\Omega$ est l'impédance d'onde en espace libre, en Ω ;

Z_C est l'impédance caractéristique, en Ω ;

e_{0y} est le facteur de champ du mode TEM, en $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$

et

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

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

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

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_H - h_g)^2}$ est la distance entre l'EST et l'antenne de réception, en m;

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_H + h_g)^2}$ est la distance image entre l'EST et l'antenne de réception, en m;
 s est la distance entre l'antenne de réception et l'EST comme indiqué dans les normes.
 Normalement, cette valeur, exprimée en mètres, est de 30 m, 10 m ou 3 m, en m;
 h_g est la hauteur de l'EST au-dessus du plan de sol, en m;
 R_H est la hauteur de l'antenne de réception au-dessus du plan de sol, en m.

Normalement cette valeur est balayée sur la plage de 1 m à 4 m.

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

$$E_{\max} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi} D_{\max} P_0} ,$$

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

Généralement, D est donnée soit par une valeur hypothétique, soit par une valeur connue *a priori*, soit par la directivité mesurée de l'EST. L'algorithme de corrélation de guide d'onde TEM à un accès a toujours comme hypothèse une estimation du «cas le plus défavorable» basée sur a) la puissance totale rayonnée sur le volume ou le cône de balayage OATS et b) le choix implicite de directivité du cas le plus défavorable. Pour une comparaison avec d'autres méthodes d'essai d'émissions de puissance totale rayonnée, par exemple chambres réverbérantes, des directivités de $D = 1,5$ ou $D = 1,7$ peuvent être utilisées. Pour les besoins de la présente norme, il a été décidé d'utiliser une directivité d'EST de petite taille du «cas le plus défavorable» avec $D = 3$.

NOTE 2 Cette corrélation est valable pour les EST de petites tailles comme défini en 5.2. Des lignes directrices pour la corrélation des EST de grande taille et des méthodes de montage sont également données dans la présente norme, à titre indicatif (A.5.1.2).

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

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

Alternativement, E_{\max} peut être exprimé en termes de dB(μ V/m) comme

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

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

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

$$E_{\max}|_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg(g_{\max}) + 20 \cdot \lg\left(\left|\frac{\eta_0 k_0}{2\pi \cdot e_{0y}}\right|\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{S^2}{Z_C}\right) + 120, \text{ en dB}(\mu\text{V/m}) \quad (\text{A.9})$$

A.4 Facteurs de correction de l'essai d'émission

A.4.1 Sources d'émission de référence

Les facteurs de correction peuvent être déterminés en utilisant un jeu de sources d'émission de référence ayant des réponses en émission bien caractérisées selon la méthode OATS. Les sources de référence sont choisies sur la base des types d'EST qui seront soumis à essai dans le guide d'onde TEM. Cinq types de sources de référence sont recommandés pour représenter des applications CEM générales. Ils représentent des variantes de matériels de table comme définis dans la CISPR 22.

- a) Un générateur de peigne alimenté par batterie avec une antenne à large bande, qui est un exemple d'EST de petite taille. Il convient que la dimension la plus importante du générateur de peigne soit inférieure à $0,1 h$, où h est l'espacement entre conducteurs. S'il n'existe aucun générateur de peigne sur le marché satisfaisant à l'exigence de taille, un générateur de peigne allant jusqu'à $0,35 h$ peut être utilisé. Dans ce cas, la taille et le type du générateur de peigne utilisé et la taille régulièrement autorisée ($0,1 h$), sont indiqués à la même position du protocole d'essai et sont marqués spécialement. Il convient que la taille de l'EST soit inférieure à une longueur d'onde à la fréquence la plus élevée soumise à essai (voir 6.2).
- b) Un générateur de peigne alimenté par batterie avec un fil fixé, qui est un exemple d'EST de grande taille sans câbles de sortie (voir en 6.3). Il convient que le fil fixé s'étende jusqu'au bord du volume d'essai utilisable, tout en restant à l'intérieur de celui-ci.
- c) Un générateur de peigne alimenté par batterie avec un fil de sortie fixé, qui est un exemple d'EST de grande taille avec câbles de sortie. Le fil fixé s'étend jusqu'à une pince de ferrite et la traverse.
- d) Une boîte (480 mm) avec générateur de peigne incorporé, avec au moins deux câbles de sortie, prévue pour être un exemple d'EST de grande taille avec câbles de sortie.
- e) Comme décrit de a) à d), avec une source de bruit à large bande incorporée.

Pour les exemples a) à d), il convient que le générateur de peigne produise des raies spectrales tous les 10 MHz ou moins sur toute la gamme de fréquences considérée. Pour l'exemple e), il convient que la source à large bande couvre toute la gamme de fréquences considérée.

Il convient que le spectre de sortie soit stable avec des variations inférieures à 1 dB pendant la durée de l'essai.

NOTE Si la plus grande dimension de la source est inférieure à $0,1 h$, une perturbation minimale du mode TEM peut être supposée.

Pour les fabricants de guides d'onde TEM de types et de tailles spécifiques, il est recommandé de réaliser les essais d'émission en utilisant les exemples d'EST dans quatre guides d'onde TEM ou plus, de même type et de même taille, et quatre, voire davantage, OATS différents. Les résultats sont valables pour tous les guides d'onde TEM de même type et de même taille. Il convient d'utiliser un montage identique d'EST, avec fonction de détection et de réception, temps de palier et largeur de bande également identiques, à toutes les fréquences et sur chaque emplacement d'essai. Il convient d'appliquer l'algorithme de corrélation à trois orientations, pour convertir les tensions mesurées avec le guide d'onde TEM en valeurs d'amplitude de champ OATS.

A.4.2 Installation des EST de petite taille

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

A.4.3 Calcul du facteur de correction pour les EST de petite taille

Dans le cas de l'exemple d'un EST de petite taille, un facteur de correction statistique a été identifié pour améliorer l'accord entre amplitudes de champ en OATS et en guide d'onde TEM, obtenu par algorithme de corrélation à trois orientations.

NOTE 1 La mesure d'émission dans les guides d'onde TEM est fondée sur la méthode de puissance totale rayonnée. Par conséquent, toutes les orientations possibles sont examinées. Lorsque l'on compare les données OATS avec les mesures en guide d'onde TEM, il convient que l'opérateur choisisse l'orientation de l'EST sur l'OATS avec l'émission maximale.

Le calcul du facteur de correction est fondé sur les différences de l'écart moyen et de l'écart-type, à la fois pour les amplitudes de champ corrélées des guides d'onde TEM et pour celles mesurées avec la méthode OATS, à chaque fréquence. Un facteur de correction du diagramme de rayonnement complémentaire a également été identifié pour améliorer l'accord entre les résultats du guide d'onde TEM et de l'OATS pour l'EST de petite taille servant d'exemple. Le facteur de correction c_f à chaque fréquence f est calculé en utilisant

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

où

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

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

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

NOTE 2 Même un EST de petite taille peut ne pas avoir de diagramme de rayonnement omnidirectionnel. Il convient que le facteur t dans l'Equation (A.10) tienne compte de cette différence. Les mesures sur différents OATS et dans différents guides d'onde TEM peuvent également donner lieu à des écarts. Ceci est pris en compte par $d_{s,f}$ dans l'Equation (A.10). L'ordre d'amplitude typique de t et $d_{s,f}$ est de 1 dB.

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

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

où

$g_{i,f}$ est l'amplitude de champ électrique de guide d'onde TEM corrélée avec le champ libre (A.3.2.4), en $\frac{V}{m}$;

$i = 1 \dots n$ n est le nombre de mesures dans les guides d'onde TEM;

$o_{k,f}$ est l'amplitude de champ électrique OATS, en $\frac{V}{m}$;

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

f est la fréquence, en Hz;

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

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

NOTE 3 Les grandeurs g_{if} et o_{kf} suivent une distribution log-normale et l'Equation A.11 peut par conséquent être exprimée selon une échelle logarithmique dans ce cas.

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

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

Dans le cas présent, $s_{\text{TEM},f}$ est l'écart-type des valeurs multiples d'amplitudes de champ du guide d'onde TEM, donné par

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

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

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

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

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

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

NOTE 4 Si le guide d'onde TEM est unique ($n = 1$), par exemple construit pour une utilisation scientifique dans un seul laboratoire, alors $s_{\text{TEM},f} = 0$ pour la détermination du facteur de correction de ce guide d'onde spécifique. Par conséquent, ces résultats ne peuvent pas être utilisés pour la validation d'un autre guide d'onde TEM, même de même type et de même taille.

Pour chaque guide d'onde TEM spécifique, le facteur d'incertitude du diagramme de rayonnement t est déduit d'une série d'essais de corrélation à trois positions effectués par exemple à partir de huit positions de départ, à savoir 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° et 315° . Par exemple, pour la position de départ de la Figure A.4.a1 ($xx'yy'zz'$), l'EST subit une rotation selon ces angles autour de l'axe y . A chaque position de départ, la méthode de corrélation à trois positions est utilisée pour produire, par addition, une série de huit valeurs d'amplitude de champ corrélées désignées E_α ($8 \times 3 = 24$ valeurs lues de tension). \bar{E}_α est la valeur moyenne du champ électrique, spécifiquement

$$\bar{E}_{0^\circ} = (E_{0^\circ} + E_{90^\circ})/2, \dots, \bar{E}_{225^\circ} = (E_{225^\circ} + E_{315^\circ})/2.$$

Une amplitude de champ maximale, $E_{\alpha,\text{max}}$, est obtenue comme étant l'amplitude de champ la plus élevée pour chaque paire de valeurs séparées de 90° . Spécifiquement

$$E_{0^\circ,\text{max}} = \max(E_{0^\circ}, E_{90^\circ}), \dots, E_{225^\circ,\text{max}} = \max(E_{225^\circ}, E_{315^\circ}).$$

Un facteur d'écart-type est calculé en utilisant l'équation suivante.

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

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

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

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

NOTE 5 Une alternative au facteur t (facteur d'incertitude du diagramme de rayonnement) peut être la méthode à six positions de [27] ou la méthode à 12 positions («à trois positions étendues») de [37]. L'aspect important est qu'il convient de capter la puissance totale rayonnée de l'EST. Des données de comparaison sont représentées en [20] et [21].

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

A.5.1 Types d'EST

A.5.1.1 EST de petite taille

Un EST de petite taille doit être soumis à essai en utilisant deux orientations de départ dans le guide d'onde TEM. La première orientation de départ est arbitraire, tandis que la seconde correspond à la première orientation de départ après rotation comme représenté à la Figure A.4. Les rotations applicables de l'EST, selon l'algorithme de corrélation, sont effectuées pour chaque orientation de départ. Par exemple, la méthode à trois orientations de A.3.2.3.2 exige que trois orientations soient soumises à essai. Cette procédure doit être réalisée avec les orientations de départ a1 et a3, ou a2 et a4 de la Figure A.4 (un total de $2 \times 3 = 6$ orientations). L'amplitude de champ corrélée la plus élevée de ces deux jeux de données doit être notée à chaque fréquence.

NOTE La gamme de fréquences est déterminée par la limite applicable ou l'objectif d'essai, généralement 30 MHz à 1 GHz pour des EST de petite taille. La gamme de fréquences utilisable est déterminée dans les essais de vérification du mode TEM (voir en 5.2.1 et 5.3.2).

A.5.1.2 EST de grande taille

La méthode donnée en A.5.1.1 peut être appliquée aux EST de grande taille. Toutefois, l'hypothèse d'application d'un dipôle dans l'algorithme de corrélation n'est pas strictement valable pour les EST de grande taille.

Les informations suivantes sont données à titre indicatif.

Pour les essais de conformité des EST de grande taille dans les guides d'onde TEM, la procédure suivante a été proposée. Des détails supplémentaires sont donnés en [2].

- Il convient de réaliser trois essais indépendants sur un type particulier d'EST avec un OATS spécifique conforme et le guide d'onde TEM spécifique.
- La différence moyenne entre les résultats du guide d'onde TEM et de l'OATS est calculée à chaque fréquence en utilisant l'Equation (A.11) avec $n = m = 3$;

- c) Il convient que la moyenne et l'écart-type en fonction de la fréquence des différences calculées à l'étape 2 pour un minimum de 10 fréquences, satisfassent aux critères selon lesquels la différence moyenne est supérieure à 0 dB et inférieure ou égale à 3 dB, et l'écart-type des différences est inférieur ou égal à 4 dB;
- d) Il convient de ne pas ajouter la différence moyenne aux valeurs lues du guide d'onde TEM pour déterminer la conformité avec la limite de perturbation. Si les critères de l'étape 3 sont satisfaits, le type d'EST est considéré conforme à la limite appropriée.

A.5.2 Montage de l'EST

Les informations suivantes sont données à titre indicatif.

L'EST est placé au centre du volume d'essai utilisable (5.2.2) sur un manipulateur (3.1.21 et Figures A.1, A.2b et A.2c) ou sur un support du montage d'essai (3.1.16).

Il convient de fixer les EST sans câbles au centre de rotation du manipulateur. En utilisant le manipulateur, l'EST subit une rotation autour de son centre électrique (qui peut être supposé identique au centre géométrique de l'EST).

Pour les EST avec câble(s), le routage de câbles suivant s'applique. Il convient que les câbles longs soient disposés en faisceaux conformément aux règles énoncées en 7.2.5.2 de la CISPR 16-2-3:2006. Il convient que le routage du ou des câbles d'interconnexion soit perpendiculaire à chaque boîtier. Pour obtenir des résultats de mesure reproductibles, il convient de ne pas changer les positions relatives du ou des câbles d'interconnexion et de l'EST au cours de l'algorithme de corrélation à trois orientations. Si le ou les câbles sont trop longs, le ou les câbles d'interconnexion peuvent être disposés en faisceau selon 7.2.5.2 de la CISPR 16-2-3.

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

A.6 Rapport d'essai

Le rapport doit inclure à la fois les résultats d'amplitude de champ corrigés (E) et non corrigés (E_{\max}), tels que déterminés selon

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

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

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

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

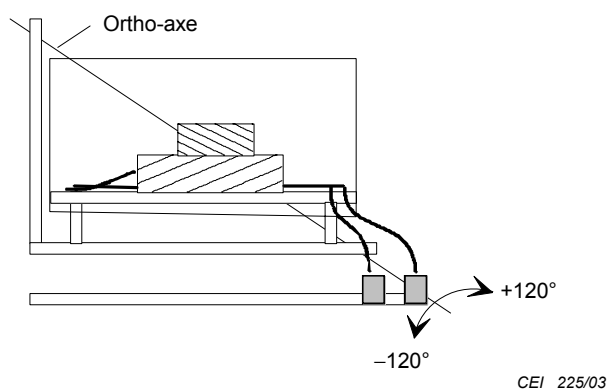


Figure A.1a – Vue de côté

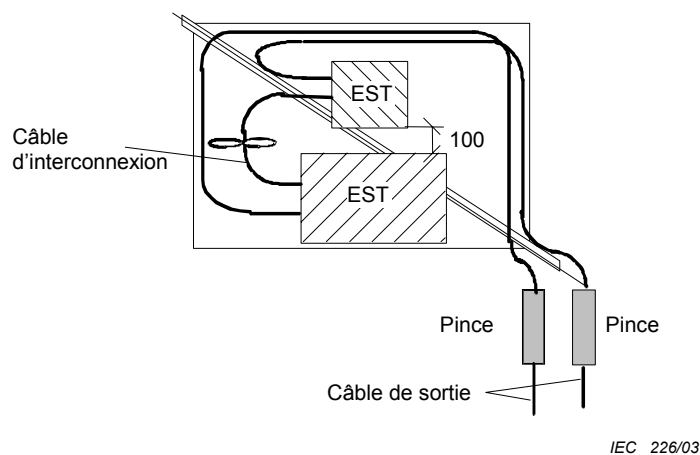


Figure A.1b – Vue de dessus

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

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

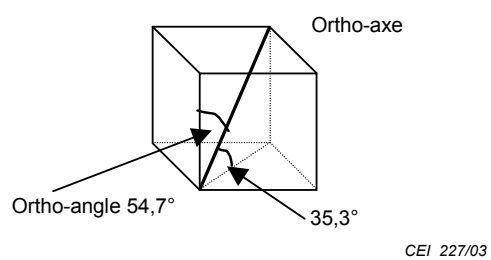


Figure A.2a – Ortho-axe et ortho-angle

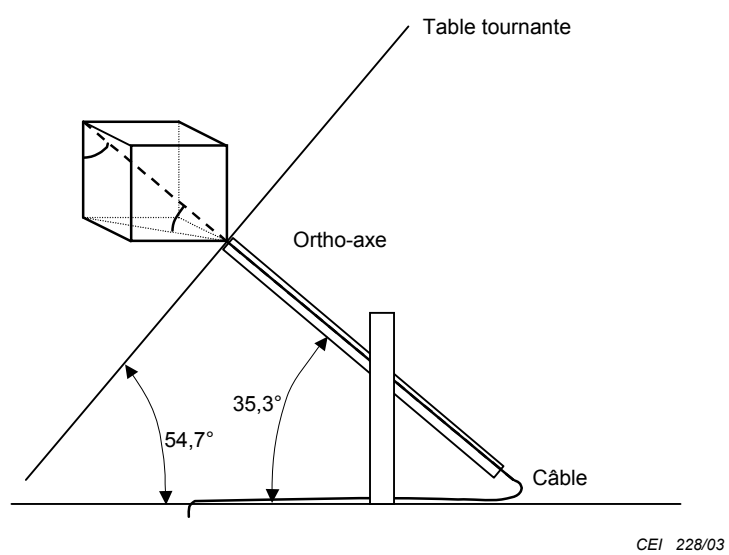


Figure A.2b – Vue de côté (voir 3.1.21 et A.5.2)

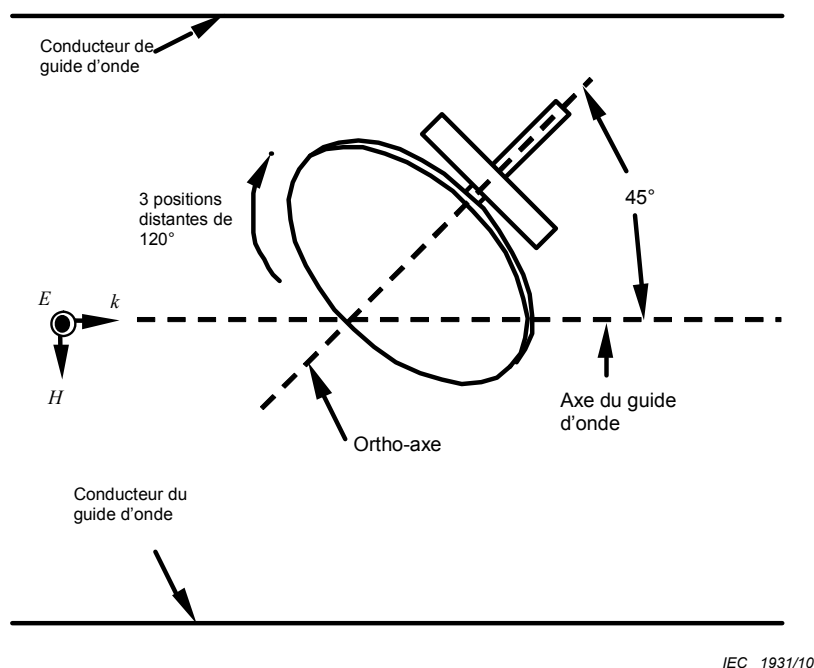
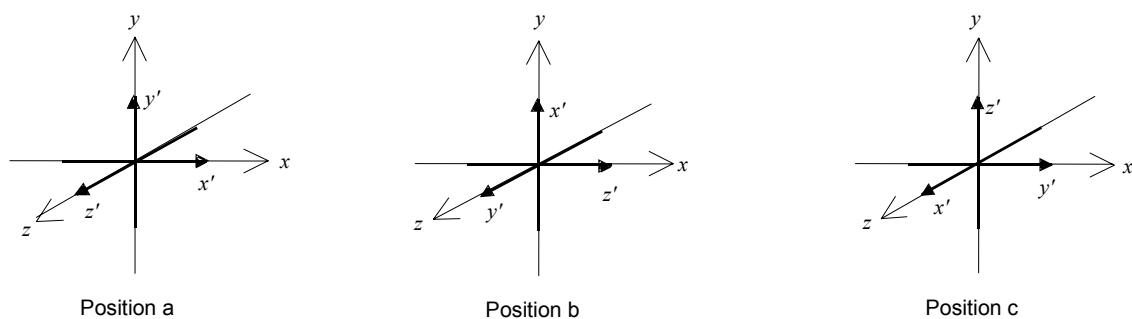


Figure A.2c – Vue de dessus (voir 3.1.21 et A.5.2)

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

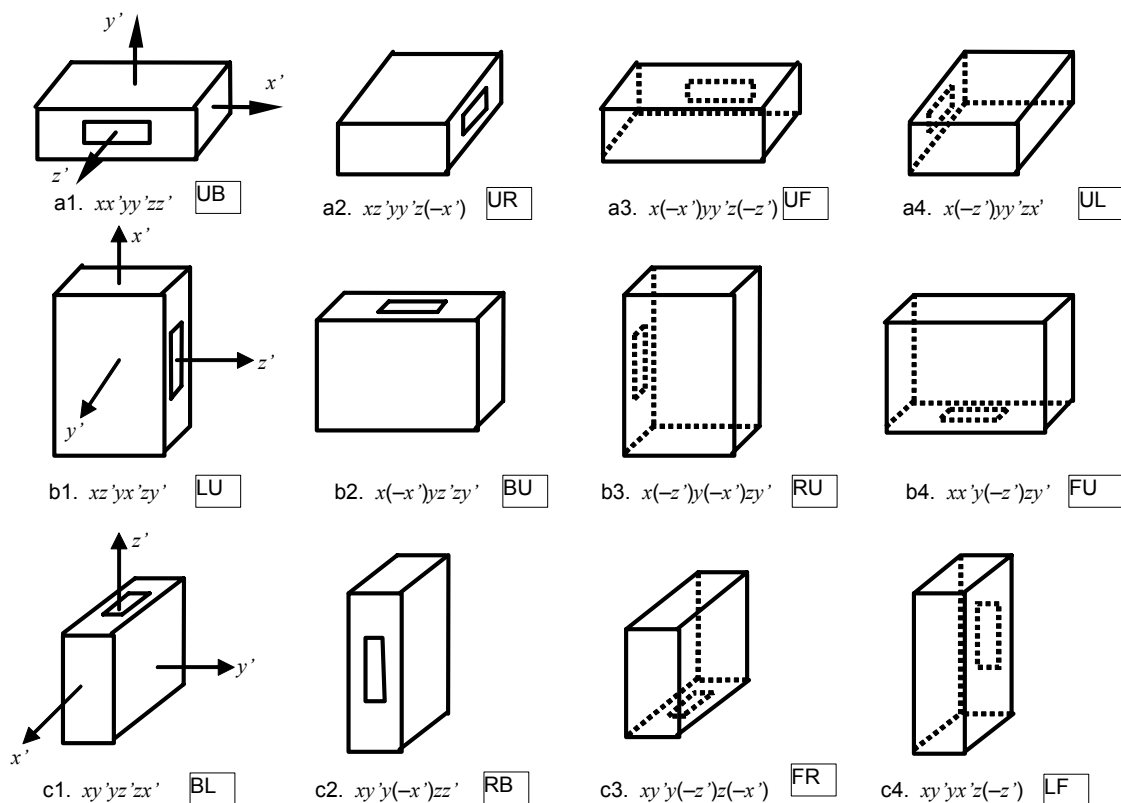
Figure A.2 – Positionneur d'ortho-axe ou manipulateur de base



IEC 1932/10

NOTE Les trois positions de rotation d'axe orthogonal correspondent aux orientations a1, b1 et c1 de la Figure A.4. Les axes de coordonnées en guide d'onde TEM x , y , z ont des symboles sans primes, alors que les axes de coordonnées x' , y' , z' de l'EST ont une notation prime.

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



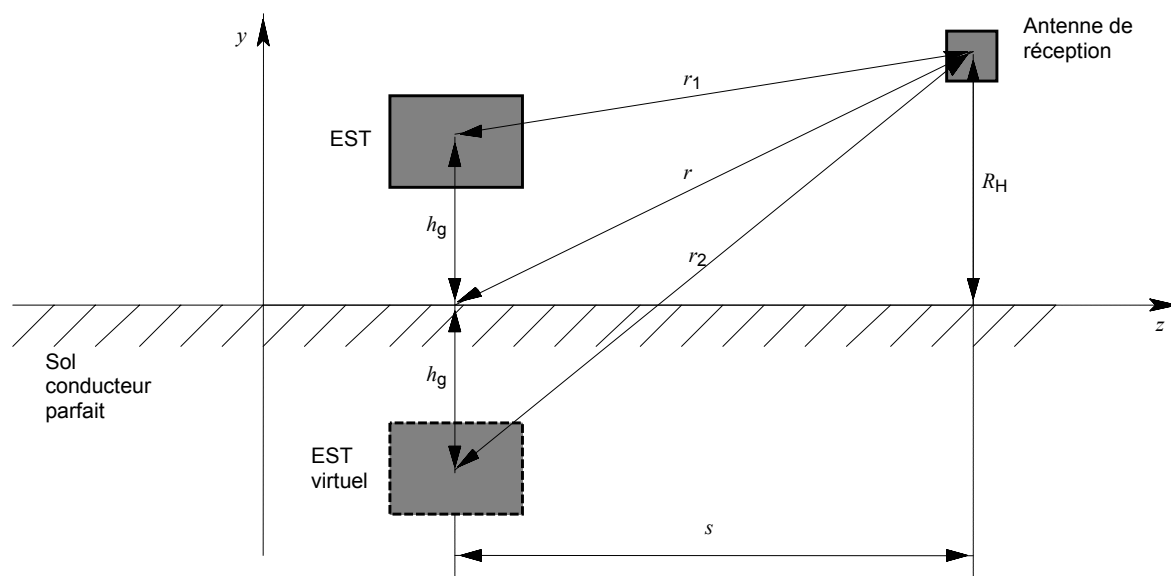
IEC 1933/10

NOTE 1 Dans cet exemple, x, y, z sont les axes de coordonnées du guide d'onde TEM, x', y', z' sont les axes de coordonnées de l'EST et le champ est polarisé le long de l'axe y et se propage le long de l'axe z . Il convient que le centre virtuel (ou géométrique ou de phase) de l'EST reste dans la même position par rapport aux conducteurs du guide d'onde TEM.

NOTE 2 Les côtés de l'EST sont définis par l'orientation a1 ($x' = x, y' = y, z' = z$): Gauche (L) = Droite (R) $\equiv y'z' = \text{plan } yz$, Arrière (B) = Face (F) $\equiv x'y' = \text{plan } xy$, Dessus (T) = Dessous (U) $\equiv x'z' = \text{plan } xz$. La direction de propagation est alignée avec l'axe z . Par conséquent, le front d'onde en a1 est le côté arrière. Chaque orientation de l'EST peut être décrite par deux lettres: la première lettre désigne le côté de l'EST qui fait face au sol du guide d'onde TEM, la seconde lettre désignant le côté qui fait face au front d'onde (vers la direction de propagation).

NOTE 3 Chaque colonne de cette figure/matrice (par exemple a3, b3, c3) montre un jeu de trois orientations orthogonales qui peuvent être utilisées pour l'algorithme de corrélation à trois orientations. De même, dans un essai d'immunité, les huit faces minimales sont données, par exemple, par les deux jeux de quatre orientations a1, a2, a3, a4 et b1, b2, b3, b4. Lorsque l'ensemble des 12 orientations est nécessaire dans un essai d'immunité, ajouter les orientations c1, b2, c3, b4, où c3 et b4 subiraient normalement une rotation de 180° autour de l'axe z . Dans ce cas c3, $xy'y(-z')z(-x')$ devient $x(-y')yz'z(-x')$, et b4 $xx'y(-z')zy'$ devient $x(-x')yz'zy'$.

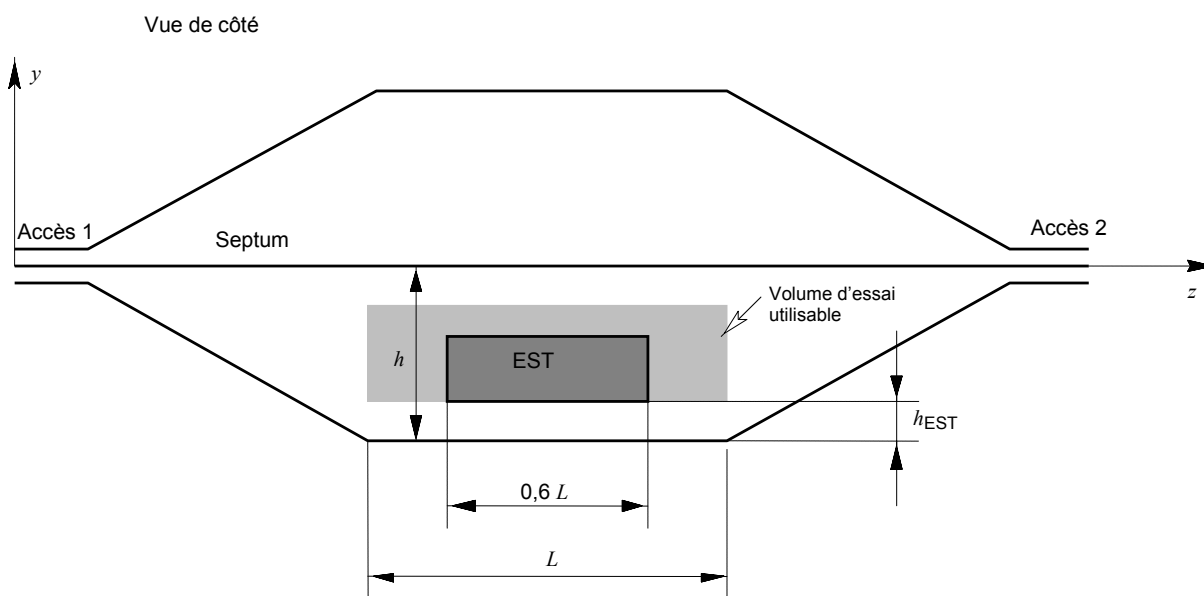
Figure A.4 – Orientations à 12 faces/axes pour un EST typique



IEC 1934/10

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

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



IEC 1935/10

Figure A.6a – Vue de côté

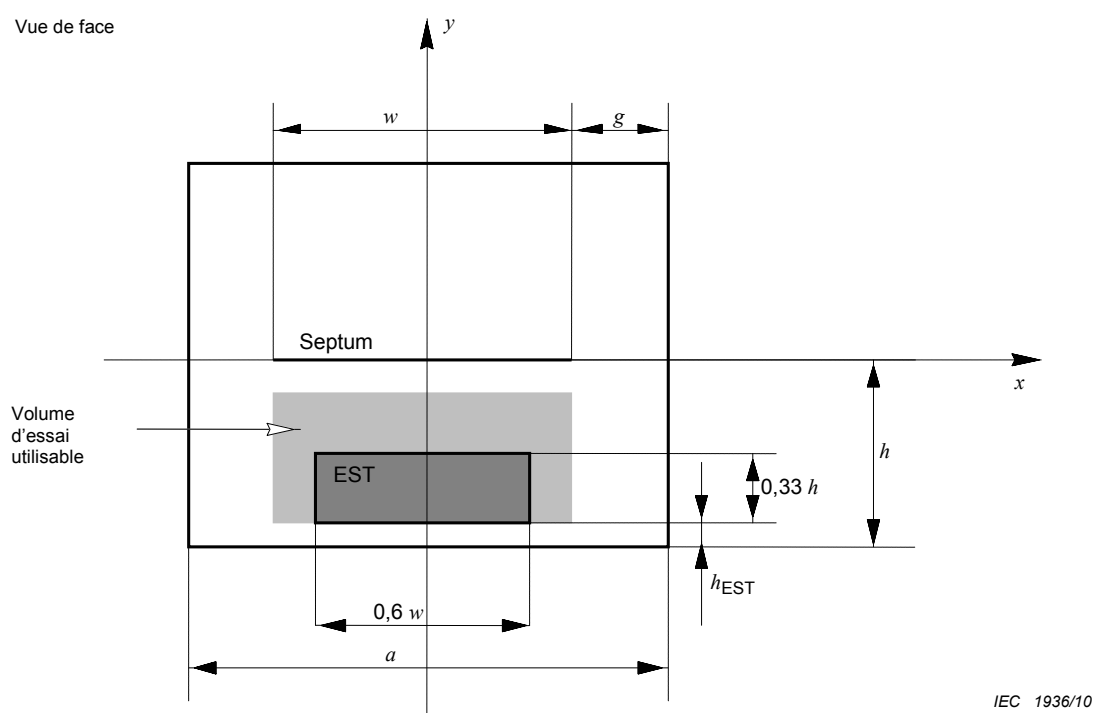


Figure A.6b – Section transversale

NOTE h_{EST} est la distance minimale entre l'EST et chaque conducteur ou absorbant du guide d'onde.

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

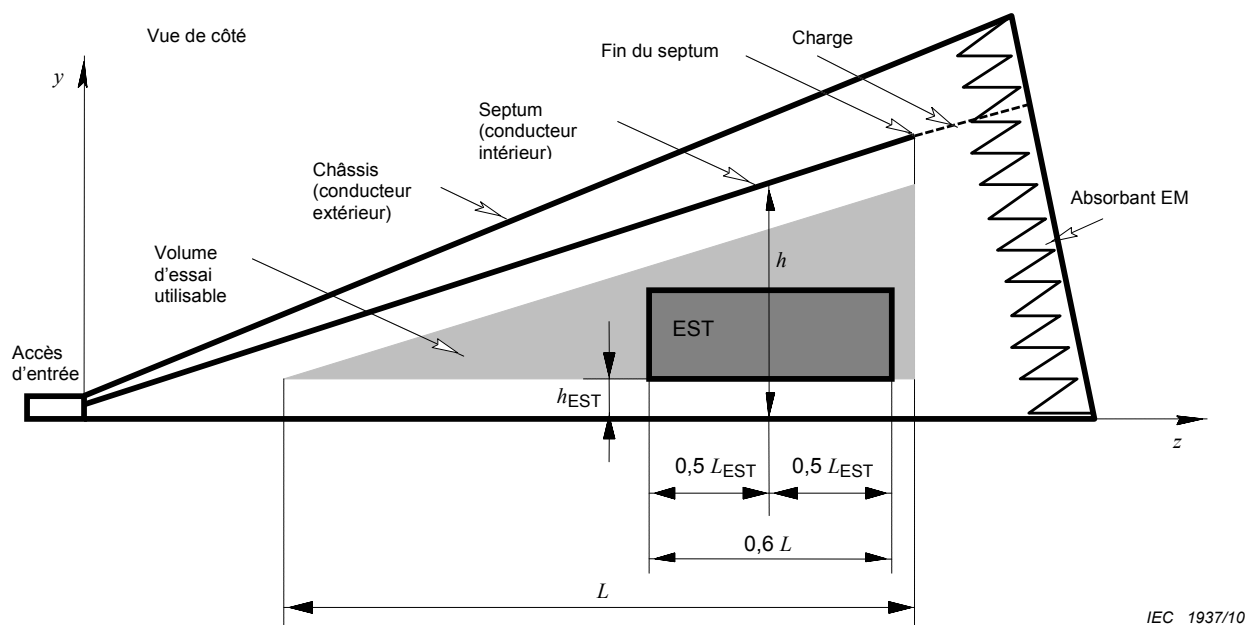


Figure A.7a – Vue de côté

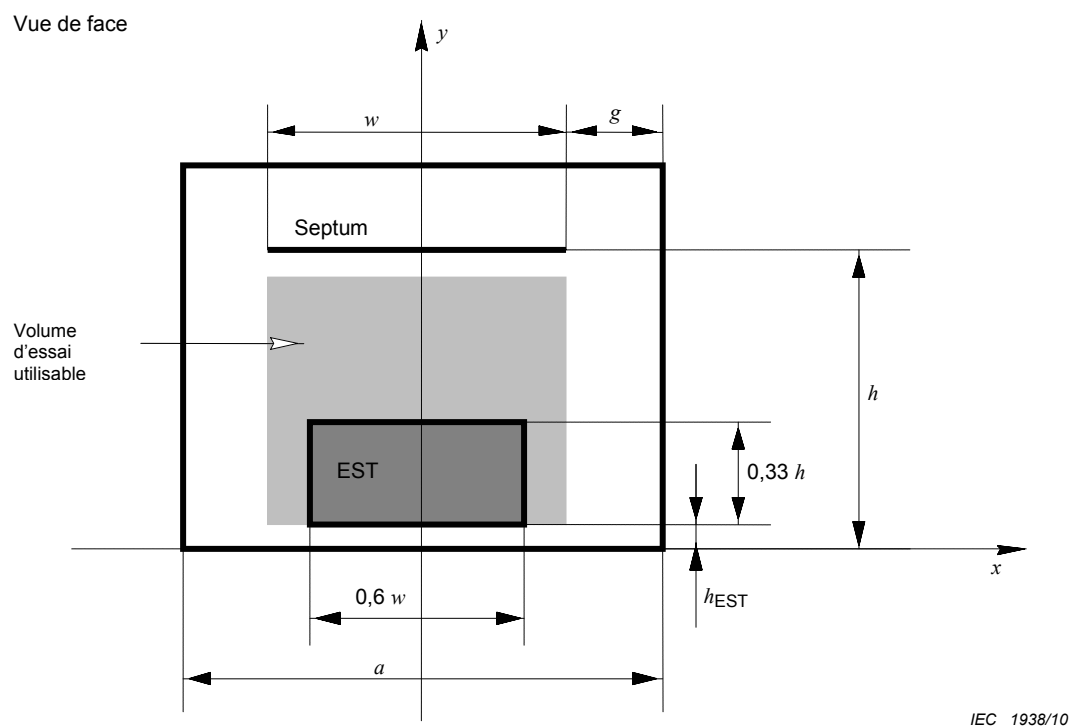


Figure A.7b – Section transversale

NOTE h_{EST} est la distance minimale entre l'EST et chaque conducteur ou absorbant du guide d'onde.

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

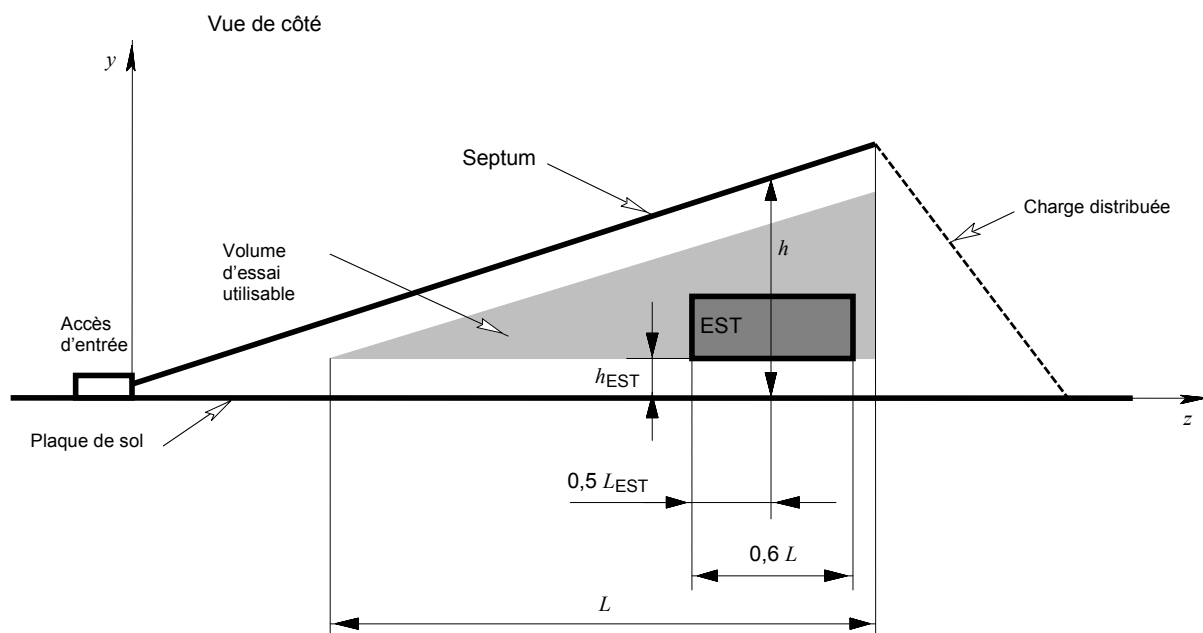
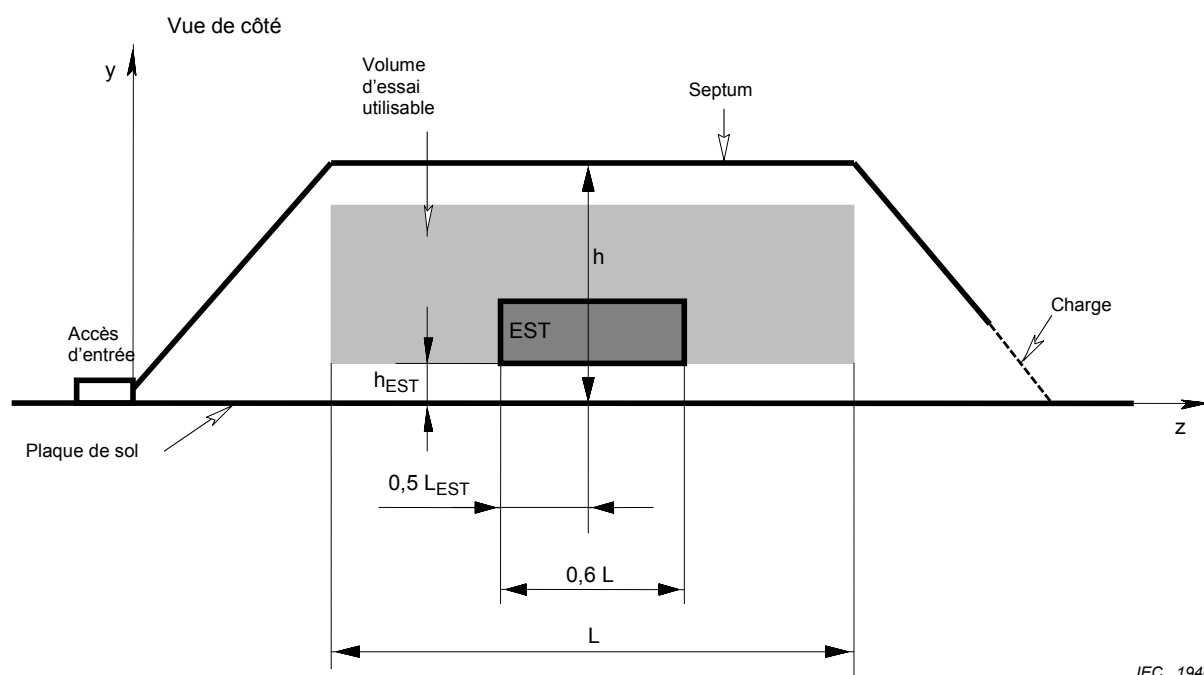


Figure A.8a – Vue de côté (un accès)



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

Figure A.8b – Vue de côté (fondamentalement similaire au guide d'onde TEM à deux accès, certaines versions présentent cependant une charge distribuée au niveau de l'accès de sortie)

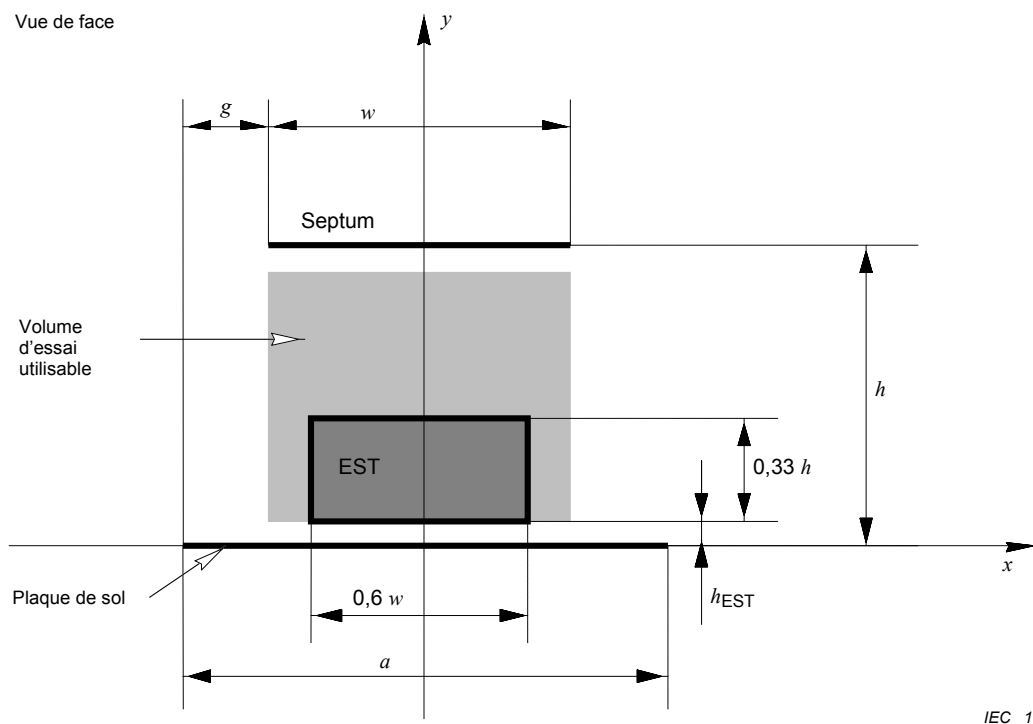
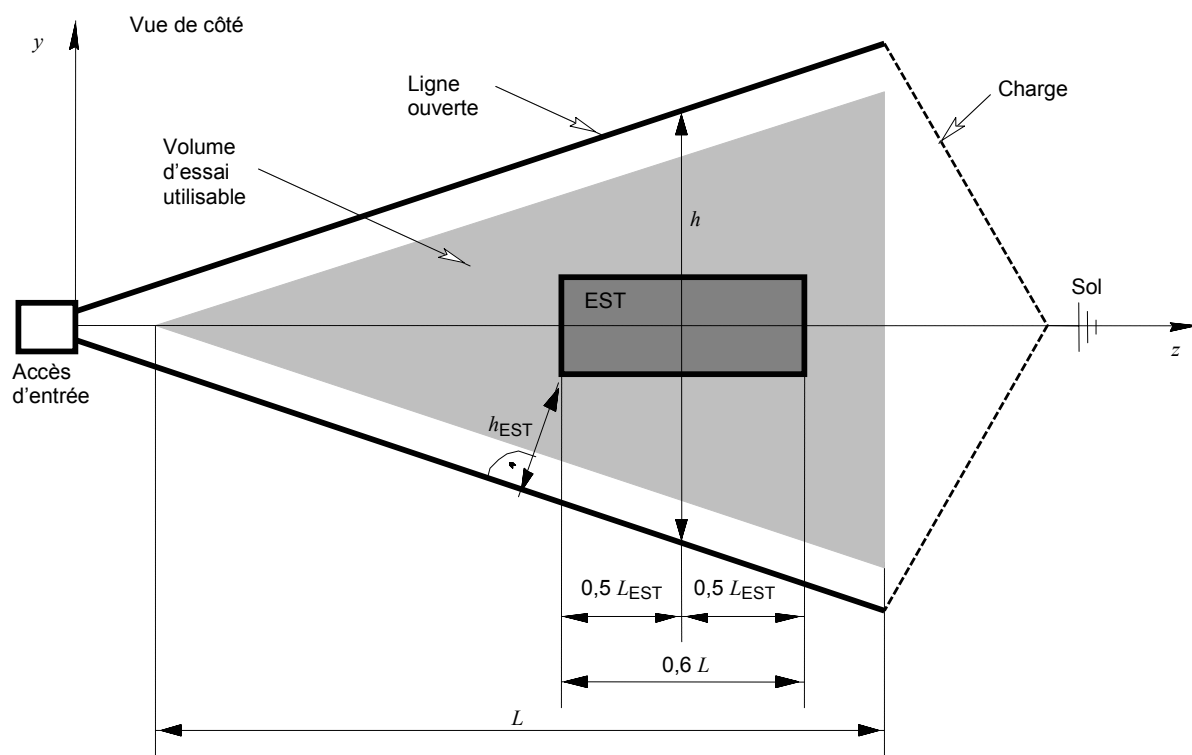


Figure A.8c – Section transversale

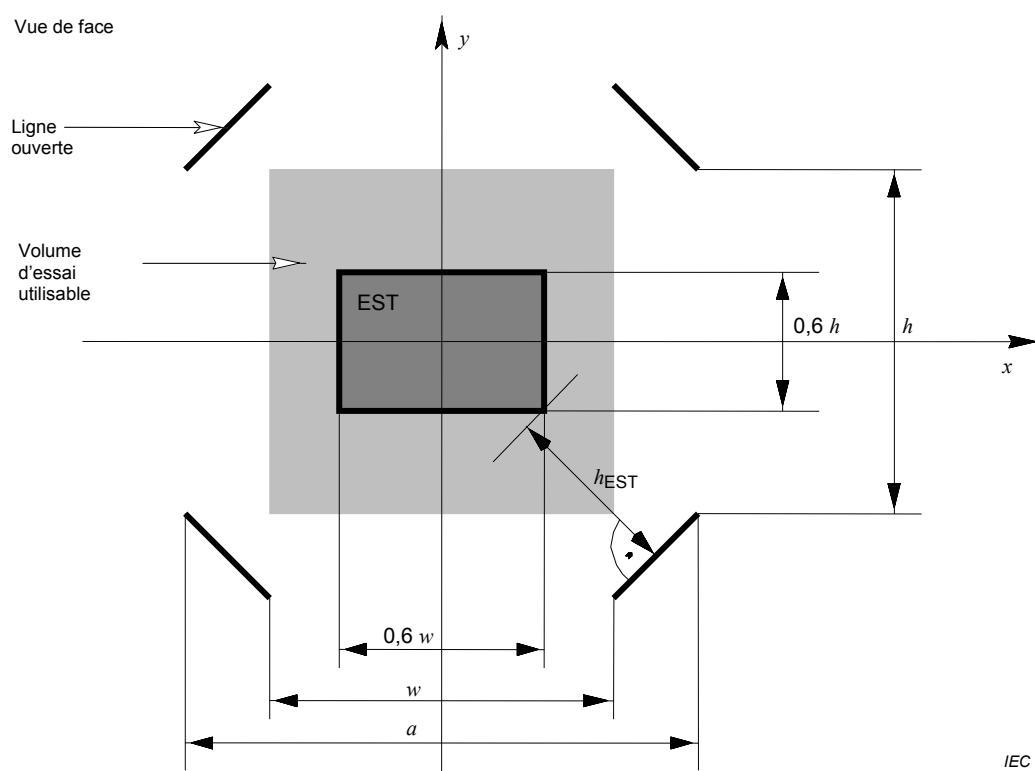
NOTE h_{EST} est la distance minimale entre l'EST et chaque conducteur ou absorbant du guide d'onde.

Figure A.8 – Ligne ouverte (deux plaques)



IEC 1942/10

Figure A.9a – Vue de côté



IEC 1943/10

Figure A.9b – Section transversale

NOTE L'ensemble de la configuration du guide d'onde TEM est entouré par une enveloppe complètement anéchoïque. Pour des raisons symétriques, la restriction de hauteur maximale utilisable de l'EST change de $0,33 h$ à $0,6 h$ (voir 5.2.2).

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

Annexe B (normative)

Essais d'immunité dans les guides d'onde TEM

B.1 Description générale

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

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

B.2 Matériel d'essai

B.2.1 Généralités

Les types de matériel d'essai suivants sont recommandés:

- guide d'onde TEM: d'une taille appropriée pour maintenir un champ uniforme de dimensions suffisantes pour contenir les EST prévus;
- filtres contre les perturbations électromagnétiques;
- générateur(s) de signal à fréquences radioélectriques: Il est souvent utile de contrôler la puissance incidente et réfléchie dans le guide d'onde TEM lors de l'établissement des niveaux de champ. Un coupleur directif accompagné d'un voltmètre ou wattmètre RF permet la mesure de la puissance réelle incidente vers un guide d'onde TEM (par opposition à la puissance nominale du générateur de signal RF). Les deux doivent couvrir la largeur de bande prévue;
- amplificateurs de puissance;
- capteurs de champ, capables de surveiller séparément le champ électrique le long des trois axes orthogonaux. Tout circuit de tête de sonde et le système optoélectronique doivent avoir une immunité appropriée à l'amplitude de champ à mesurer et une liaison à fibres optiques vers l'indicateur à l'extérieur du guide d'onde TEM. Une ligne de signal correctement filtrée peut également être utilisée. Les guides d'onde TEM exigent une sonde de champ permettant la mesure du champ électrique de manière individuelle le long des trois axes orthogonaux. Si une petite antenne à un seul axe est utilisée, elle doit être repositionnée pour mesurer chaque composante de champ séparément;
- matériels associés pour enregistrer les niveaux de puissance.

B.2.2 Description de l'installation d'essai

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

Pour les guides d'onde TEM, le mode TEM est équivalent à une onde plane incidente permettant de réaliser les essais d'immunité. Alors qu'une onde plane idéale est invariante sur tout front à phase constante, les champs de mode TEM varieront, dans une ligne de transmission, sur un front à phase constante conformément aux caractéristiques de la géométrie de la section transversale. Les méthodes en chambre anéchoïque et en guide d'onde TEM sont toutes deux fondées sur une distribution de champ d'onde plane avant insertion de l'EST. Un diagramme de champ en mode TEM est plus proche de la polarisation

verticale dans une chambre anéchoïque, alors que dans une chambre, le diagramme de champ en polarisation horizontale est plus sujet aux distorsions causées par les réflexions du plan de sol.

B.2.3 Validation de l'uniformité du champ

Conformément à 5.2.3.1, NOTES 2 et 3, la validation est effectuée pour un plan rectangulaire et au moins 5 points de mesure (4 aux angles et un au centre). L'uniformité est obtenue si l'Equation (5) avec l'écart-type conforme à l'Equation (6) est satisfaite pour

- a) 75 % de l'amplitude de champ mesurée E_i qui correspondent à l'amplitude de la composante de champ électrique primaire sur la zone définie, doivent satisfaire à l'Equation suivante:

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + 2 \cdot K \cdot c \frac{-}{E}$$

NOTE 1 E_{Limit} est la limite indiquée dans la norme.

NOTE 2 Selon le Tableau 1 de 5.2.3, K est choisie égale à 1,15 pour 75 %.

NOTE 3 S'il faut que $2 \cdot K \cdot c \frac{-}{E}$ soit inférieur à 6 dB, l'écart-type est calculé avec l'Equation (6) de 5.2.3 comme suit:

$$\begin{matrix} 0 \\ +6 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} \leq 2,61 \text{ en dB}$$

NOTE 4 Si l'intervalle de 75 % est fixé à 10 dB, l'écart-type acceptable est

$$\begin{matrix} 0 \\ +10 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{10}{2 \cdot 1,15} \leq 4,34 \text{ en dB}$$

- b) les amplitudes des deux composantes de champ électrique secondaire (non voulues) sont au moins inférieures de 6 dB à la composante primaire. Un pourcentage donné de ces relations mesurées doit satisfaire à l'équation:

$$\frac{E_{\text{sec}_i}}{E_{\text{pri}_i}} \leq \left(\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \right)_{\text{dB}} + K \cdot \sigma \frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \leq \begin{cases} -6\text{dB} \\ -8\text{dB} \end{cases},$$

avec K choisie selon le Tableau 1 de 5.2.3.

L'écart-type du jeu de mesures $\frac{E_{\text{sec}_i}}{E_{\text{pri}_i}}$ doit satisfaire à l'équation suivante

$$\sigma \frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \leq \frac{1}{K} \left(\begin{cases} -6\text{dB} \\ -2\text{dB} \end{cases} - \left(\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \right)_{\text{dB}} \right)$$

Une tolérance sur la composante de champ électrique primaire (voir l'Equation (7) de 5.2.3) supérieure à $\begin{matrix} -0 \\ +6 \end{matrix}$ dB allant jusqu'à $\begin{matrix} -0 \\ +10 \end{matrix}$ dB, ou un niveau de composante de champ électrique secondaire atteignant jusqu'à – 2 dB de la composante de champ primaire, est autorisée pour un pourcentage maximal de fréquences d'essai définies en 5.2.1, sous réserve que la tolérance et les fréquences réelles soient indiquées dans le rapport d'essai.

NOTE 5 Suivant l'Equation (7) de 5.2.3, les écarts-types sont calculés selon

$$\begin{matrix} 0 \\ +6 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} = 2,61 \text{ et } \begin{matrix} 0 \\ +10 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_E^- \leq \frac{10}{2 \cdot 1,15} = 4,34 \text{ en dB}$$

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

Dimensions	Disposition et nombre de points de mesure
1,5 m × 1,5 m	4 × 4 = 16
1,0 m × 1,5 m	3 × 4 = 12
1,0 m × 1,0 m	3 × 3 = 9
0,5 m × 1,0 m	2 × 3 = 6
0,5 m × 0,5 m	4 + 1 (centre) = 5
0,25 m × 0,25 m	4 + 1 (centre) = 5

Les zones qui ne figurent pas dans le Tableau B.1 doivent être étalonnées en utilisant un nombre de grilles défini par la plus petite grille de 0,5 m contenant intégralement la zone proposée. L'espacement de grille doit être uniforme le long de chaque côté. Dans le montage d'essai, la face de l'EST doit être éclairée de manière coïncidente avec ce plan, voir Figure B.2.

EXEMPLE 1 Une zone de 20 cm × 20 cm utilisant 4 + 1 (centre) = 5 points, une zone de 80 cm × 80 cm utilisant 3 × 3 = 9 points et une zone de 1,2 m × 0,6 m utilise 4 × 3 = 12 points.

EXEMPLE 2 Une zone uniforme de 1,2 m × 0,6 m doit utiliser une taille de cellule de base de 0,4 m × 0,3 m.

L'exigence d'utilisation d'une zone uniforme est basée sur la méthode de validation du mode TEM décrite en 5.2.1. En principe, l'uniformité de champ est vérifiée en termes de composante de champ primaire en mode TEM. Si l'amplitude de champ résultante est utilisée à la place, toutes les exigences mentionnées ci-dessus doivent être satisfaites et il doit être démontré que les exigences sur les composantes secondaires de 5.2.1 sont satisfaites. D'autres informations concernant l'homogénéité de champ sont données en [17].

B.2.4 Niveaux d'essai

Les niveaux d'essai sont donnés pour servir de lignes directrices au Tableau B.2.

Tableau B.2 – Niveaux d'essai

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

B.2.5 Harmoniques

Certains guides d'onde TEM peuvent présenter des résonances à des fréquences supérieures à la fréquence utile supérieure recommandée.

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

B.3 Montage d'essai

B.3.1 Installation d'un matériel posé sur table

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

B.3.2 Installation d'un matériel posé au sol

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

B.3.3 Installation des câbles

Le câblage reste exposé au champ électromagnétique sur une distance de 1 m à partir de l'EST et il est placé au-dessus du sol, soit au niveau de l'EST, soit le long d'une diagonale dans le plan xy , jusqu'au point de sortie dans le conducteur extérieur du guide d'onde TEM (cellule TEM: paroi, sol). La disposition des câbles dans la direction z le long du conducteur extérieur ou intérieur doit être évitée. Les câbles disposés parallèlement au conducteur intérieur ou extérieur du guide d'onde TEM doivent être espacés du conducteur d'au moins 0,1 m. Des pinces absorbantes constituent la terminaison des câbles de sortie (voir A.5.2). La terminaison du câble de sortie est placée à la limite de la zone uniforme. Pour obtenir des lignes directrices sur les caractéristiques des pinces absorbantes, voir les descriptions dans la CISPR 16-1-4.

B.4 Procédures d'essai

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

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

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

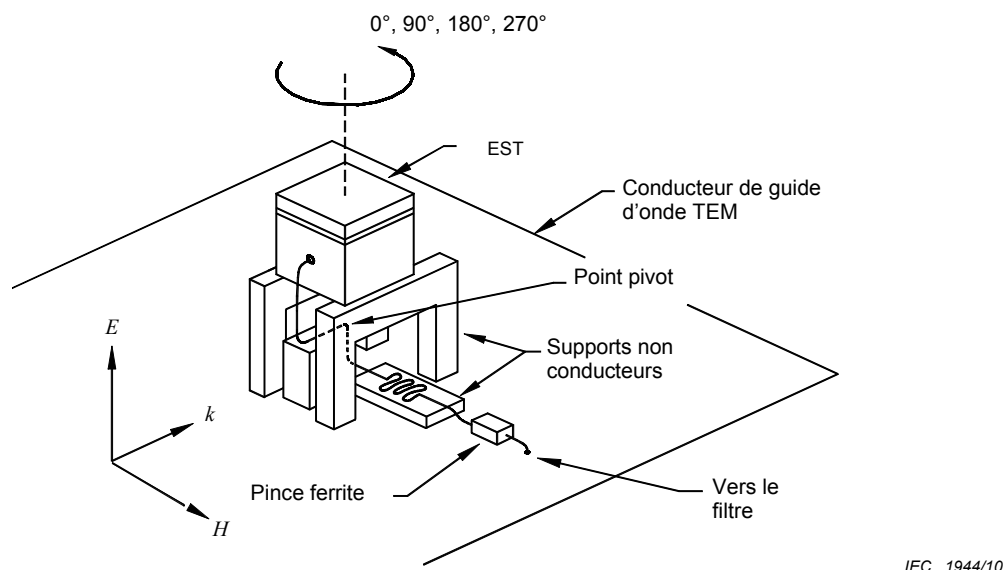
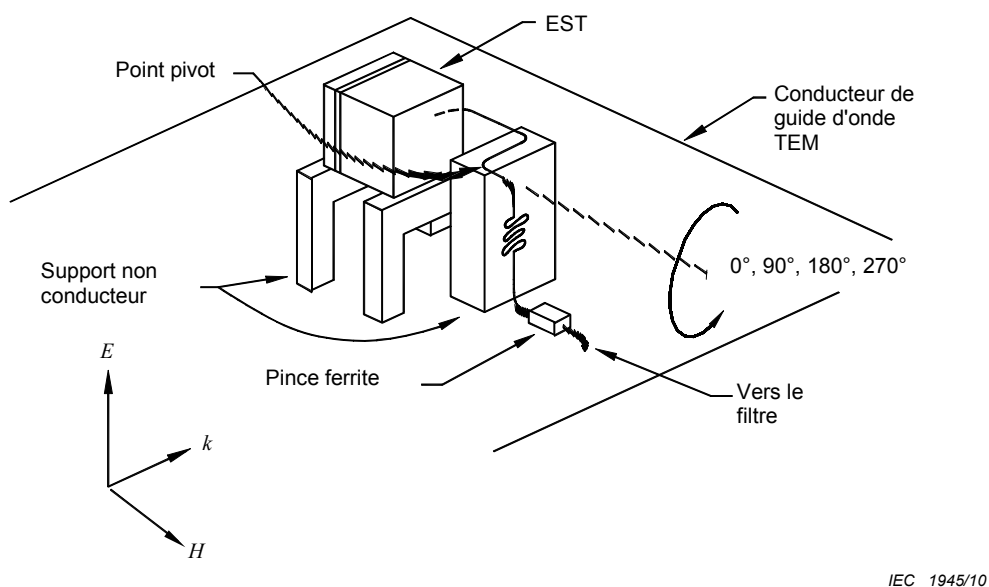
Le palier de fréquences doit être égal à 1 % de la fréquence précédente. Le temps de palier à chaque fréquence ne doit pas être inférieur au temps nécessaire à l'EST pour être mis à l'épreuve et pouvoir réagir, mais ne doit en aucun cas être inférieur à 0,5 s. Cependant, un temps de palier de 1 s est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

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

Les gammes de fréquences à considérer doivent être couvertes par paliers de fréquences, selon l'exigence ci-dessus, avec le signal modulé en amplitude à 80 % par une onde sinusoïdale de 1 kHz, en respectant des pauses pour ajuster le niveau du signal RF ou pour commuter les oscillateurs si nécessaire.

B.5 Résultats et rapport d'essai

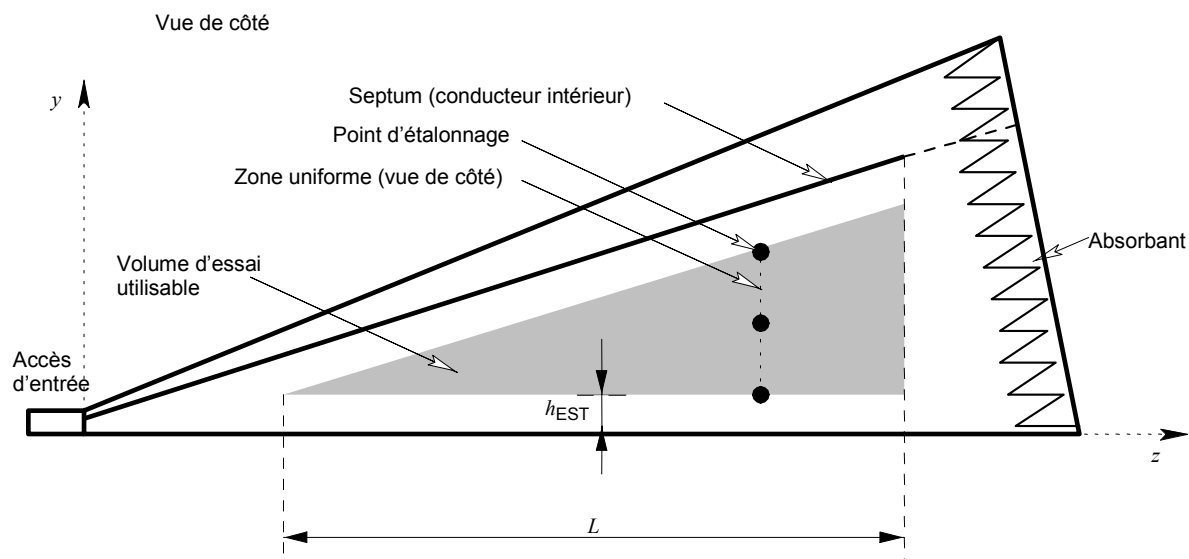
Outre le contenu habituel du rapport d'immunité aux perturbations rayonnées, des précisions concernant la taille, le type et les méthodes de vérification du guide d'onde TEM doivent être indiquées.

**Figure B.1a – Polarisation verticale****Figure B.1b – Polarisation horizontale**

- E Composante de champ électrique primaire
H Champ magnétique
K Direction de propagation (vecteur d'onde)

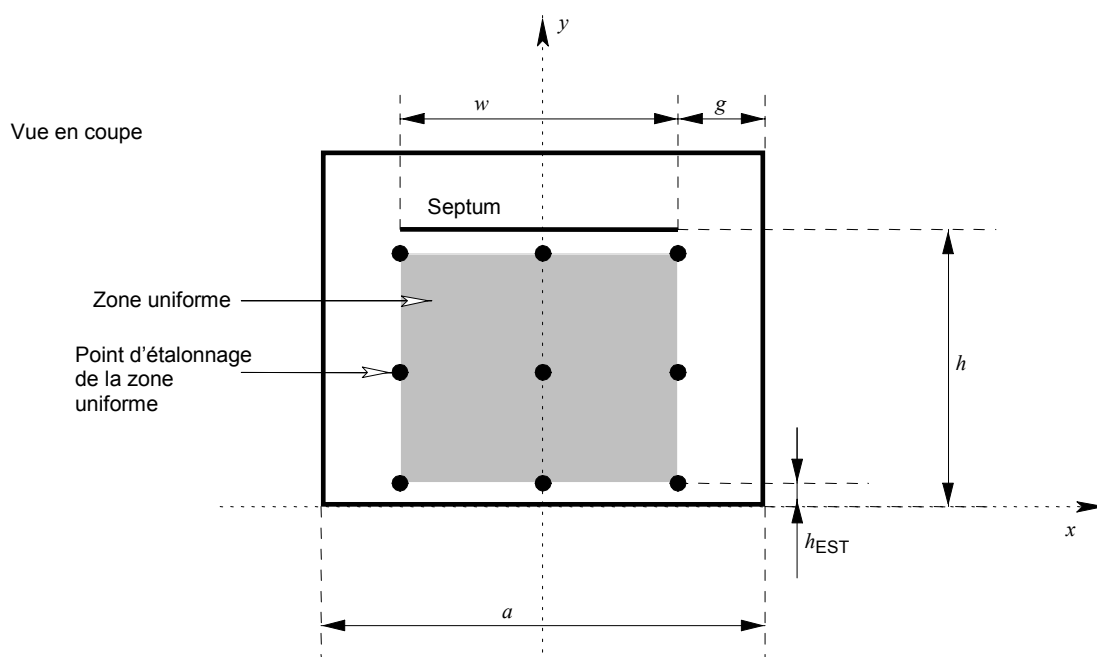
La disposition du câble du côté filtre du point pivot doit rester fixe. Les supports du montage d'essai (3.1.16) peuvent être repositionnés si nécessaire au cours des rotations. Il convient que les supports du montage d'essai aient une épaisseur de 0,1 m. Les EST à unités multiples doivent être fixés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

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



IEC 1946/10

Figure B.2a – Vue de côté



IEC 1947/10

Figure B.2b – Section transversale

NOTE Exemple d'une zone uniforme avec 3×3 points d'étalonnage dans une cellule GTEM conformément à B.2.3. La Figure B.2b montre la taille maximale possible de la zone uniforme. La limite de la zone uniforme (plane) est donnée par les points d'étalonnage extérieurs. Les points d'étalonnage ne peuvent pas se situer à l'extérieur du volume d'essai utilisable (voir 5.2.2 et les Figures A.6 à A.9).

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

Annexe C (normative)

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

C.1 Description générale

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

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

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

C.2 Essais d'immunité

C.2.1 Généralités

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

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

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

où

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

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

$$k = 1,3;$$

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

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

t est la durée en secondes (s);

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

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

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

où f est la fréquence en hertz (Hz).

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

NOTE Pour des détails supplémentaires voir [23].

C.2.2 Installations d'essai pour les perturbations rayonnées

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

- le rapport de champ électrique de crête sur le champ magnétique de crête doit être égal à $\eta_0 = 377 \, \Omega \pm 50 \, \Omega$;
- le temps de montée entre 10 % et 90 % de la valeur de crête doit être de $2,25 \, \text{ns} \pm 0,25 \, \text{ns}$;
- le champ électrique doit augmenter de façon continue pendant le temps de montée de 10 % à 90 %;
- la largeur d'impulsion (le temps entre les points sur les fronts et les flancs arrière de l'impulsion à 50 % de E_{peak}) doit être de $27,5 \, \text{ns} \pm 2,5 \, \text{ns}$;
- l'amplitude de toute pré-impulsion du champ électrique doit être inférieure ou égale à 7 % de l'amplitude du champ de crête;
- les réflexions de champ électrique provenant de la terminaison du simulateur doivent être inférieures à 10 % de l'amplitude du champ de crête;
- les fluctuations dans le spectre de fréquences lissé du champ électrique au centre du volume d'essai ne doivent pas être supérieures à $\pm 3 \, \text{dB}$ par rapport au spectre théorique dans la largeur de bande comprise entre 100 kHz et 300 MHz;
- au moment de la valeur de crête du champ primaire, d'autres composantes électromagnétiques secondaires (voir 3.1.19) doivent être inférieures à 10 % de la valeur de crête du champ primaire. Il est reconnu que cette exigence est plus sévère que celle donnée au 5.2.1;
- le champ électrique de crête doit être uniforme dans le volume d'essai selon les critères suivants: le champ électrique de crête dans le volume d'essai doit se situer dans la plage de E_{peak} et $2 E_{\text{peak}}$ dans le domaine temporel;
- pour évaluer les tolérances de champ, les mesures des champs électrique et magnétique au centre et aux huit coins du volume d'essai doivent être réalisées en l'absence de l'EST.

C.2.3 Exigences du spectre dans le domaine fréquentiel

Outre les exigences concernant les champs transitoires du simulateur IEM-HA, les exigences suivantes doivent être appliquées au spectre dans le domaine fréquentiel des champs du simulateur:

- a) le spectre de fréquences doit être calculé en utilisant une forme d'onde transitoire échantillonnée de manière uniforme avec 4 096 échantillons entre le temps de début de 0 μ s et le temps de fin de 2 μ s. Un spectre de fréquences à valeurs complexes de 4 096 points doit être calculé en utilisant une FFT (transformée de Fourier rapide) ou une DFT (transformée de Fourier discrète) avec un intervalle d'échantillonnage de fréquences de 0,5 MHz, et une fréquence maximale de 1,0 GHz;
- b) le spectre du domaine fréquentiel doit être lissé en utilisant une moyenne de fenêtrage à cinq points (c'est-à-dire que le spectre doit être moyenné sur une fenêtre de 2 MHz);
- c) l'amplitude qui résulte du spectre lissé doit se situer dans les limites du niveau spécifié en dB, du spectre de la forme d'onde spécifiée de l'Equation (C.2) et elle est représentée à la Figure C.1.

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

C.3 Matériel d'essai

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

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

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

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

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

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

C.4 Montage d'essai

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

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

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

C.5 Procédure d'essai

C.5.1 Généralités

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

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

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

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

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

Les essais de laboratoire doivent être réalisés dans les conditions d'environnement ambiantes identifiées en 7.2. Les essais in situ ne sont pas adaptés aux essais d'acceptation en matière d'immunité, ces essais pouvant toutefois être utilisés pour vérifier l'immunité du matériel installé ainsi que l'immunité du système. Pour les essais in situ, les conditions ambiantes décrites en 7.2 sont souhaitables mais pas exigées.

C.5.2 Niveau de sévérité et expositions d'essai

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

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

C.5.3 Procédure d'essai

C.5.3.1 Mesures des paramètres d'essai

Les paramètres climatiques définis en 7.2 doivent être mesurés par l'opérateur d'essai et documentés. Les caractéristiques de l'installation d'essai comportant une série de mesures des formes d'ondes du champ électromagnétique, à l'intérieur du volume d'essai sans que l'EST soit présent, doivent être mises à la disposition de l'opérateur d'essai. Cette information doit également inclure une évaluation qui indique que les exigences pour l'uniformité de champ et les caractéristiques de forme d'onde indiquées en C.2.2 et C.2.3 sont satisfaites. Une mesure de champ électrique de référence doit être consignée pour chaque impulsion d'illumination de champ.

C.5.3.2 Procédure d'essai pour les perturbations rayonnées

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

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

Chaque essai d'immunité à un niveau de sévérité spécifié comprend des expositions à trois niveaux: le niveau de sévérité spécifié et les deux niveaux immédiatement inférieurs. Si un

seul niveau inférieur est défini par la présente norme internationale, alors seul un niveau doit être utilisé. Si le niveau de sévérité le plus bas est spécifié, alors seul ce niveau d'exposition est nécessaire pour l'essai d'immunité. Au minimum deux impulsions du champ d'illumination doivent être réalisées pour chaque niveau d'exposition.

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

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

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

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

C.5.4 Exécution de l'essai

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

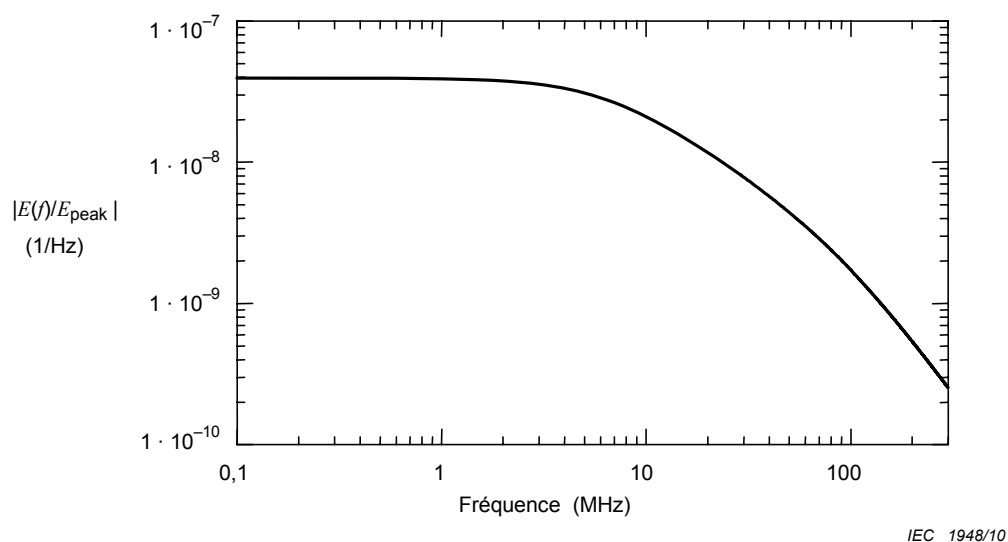
C.5.5 Exécution de l'essai d'immunité aux perturbations rayonnées

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

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

- les niveaux d'exposition d'essai: le niveau de sévérité choisi et les deux niveaux immédiatement inférieurs;
- le nombre d'expositions à chaque niveau (au moins deux sont exigées);
- les points d'entrée ou les accès à évaluer;
- la description des positions des câbles et les mesures à effectuer;
- le matériel auxiliaire exigé;
- la polarité et l'angle d'incidence des champs simulés;

- les détails du montage d'essai, lorsqu'il est différent de celui spécifié à l'Article C.4 de la présente norme;
- les critères d'acceptation et de refus.



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

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

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

Niveau d'essai	Essai exigé pour les matériels et les systèmes avec la protection suivante ^a	Valeur de crête de champ électrique E_{peak} ^b kV/m
R1	Concept 4	0,5
R2	Valeur intermédiaire	1
R3	Valeur intermédiaire	2
R4	Concepts 2A, 2B, 3	5
R5	Valeur intermédiaire	10
R6	Valeur intermédiaire	20
R7	Concepts 1A, 1B	50
RX	Applications spéciales	X
^a Les concepts de protection sont décrits dans la CEI 61000-5-3.		
^b Conformément à la CEI 61000-2-11, Tableau 2.		

Annexe D (informative)

Caractérisation des guides d'onde TEM

D.1 Description générale

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

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

Un guide d'onde TEM est une ligne de transmission. Les impédances d'onde et les impédances caractéristiques d'une ligne de transmission sans pertes sont définies comme suit en [33].

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

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

où

- η est l'impédance d'onde;
- E_p est la composante transverse du champ électrique;
- H_ϕ est la composante transverse du champ magnétique;
- μ est la perméabilité diélectrique de la ligne de transmission (l'air généralement);
- ε est la permittivité diélectrique de la ligne de transmission (l'air généralement);
- β est la constante de propagation (partie réelle);
- ω est la fréquence rayonnante.

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

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

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

où

- Z_c est l'impédance caractéristique de la ligne coaxiale;
- V_0 est la tension de la ligne coaxiale;
- I_0 est le courant de la ligne coaxiale;
- E_p est la composante transverse du champ électrique;
- H_ϕ est la composante transverse du champ magnétique;
- h $2h = r_i, r_i$: rayon du conducteur intérieur;
- a $a = r_a, r_a$: rayon du conducteur extérieur.

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

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

D.3 Onde TEM

D.3.1 Généralités

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

D.3.2 Espace libre / mode TEM

En mode TEM, les vecteurs de champs électriques et les vecteurs de champs magnétiques sont entièrement transverses par rapport à la direction de propagation de l'énergie (vecteur de Poynting \vec{S}). La direction de transmission ne comprend aucune composante de \vec{E} ou de \vec{H} .

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

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

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

Les propriétés essentielles du mode TEM sont:

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

NOTE La situation ci-dessus est observée à une distance importante d'une antenne d'émission. Par conséquent, le mode TEM est souvent appelé «condition en champ lointain» d'une antenne.

D.3.3 Guide d'onde

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

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

D.4 Propagation d'onde

D.4.1 Généralités

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

D.4.2 Propagation sphérique

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

D.4.3 Propagation d'onde plane en espace libre

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

D.4.4 Vitesse de propagation

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

D.5 Polarisation

D.5.1 Vecteur polarisation

La direction du vecteur champ électrique représente le vecteur polarisation.

D.5.2 Polarisation linéaire et elliptique

En général, la direction du vecteur polarisation change dans le temps. La courbe tracée par l'extrémité du vecteur polarisation, représentée à la Figure D.3, définit le type de polarisation.

A partir de [7], la forme de la courbe de polarisation peut être calculée à l'aide de la procédure suivante. Le vecteur champ électrique transverse est donné par

$$\vec{E}_{tr}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \underline{V}_{-i} \cdot \vec{e}_{tr_i} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (\text{D.5})$$

Le premier terme de la série représente le mode TEM; ainsi un vecteur de Fresnel complexe peut être écrit sous la forme suivante

$$\underline{\vec{A}}_{\text{TEM}} = \underline{V}_1 \cdot \vec{e}_{tr_1} = \underline{V}_{\text{TEM}} \cdot \vec{e}_{tr_{\text{TEM}}} \quad (\text{D.6})$$

Le vecteur de Fresnel peut être séparé en parties réelle et imaginaire

$$\underline{\vec{A}}_{\text{TEM}} = \underline{\vec{a}}_r + j\underline{\vec{a}}_i \quad (\text{D.7})$$

Les vecteurs \vec{a}_r et \vec{a}_i définissent un plan fixe. En général, l'extrémité du vecteur \vec{E} se déplace sur une ellipse. Si \vec{a}_r et \vec{a}_i sont parallèles, \vec{E} se déplace sur une ligne fixe. Ce cas est appelé polarisé linéairement. Tous les modes individuels sont fondamentalement polarisés linéairement. Seule la superposition avec d'autres modes donne lieu à une polarisation circulaire. Le mode TEM intentionnel pour les essais dans les guides d'onde TEM est habituellement polarisé linéairement.

D.6 Types de guides d'onde TEM

D.6.1 Généralités

La version la plus simple d'un guide d'onde TEM est une ligne de transmission à deux conducteurs comme représentée à la Figure D.5.

La ligne de transmission complète peut être divisée en trois sections.

a) Section d'alimentation

Il s'agit de l'accès auquel un générateur ou un récepteur de signal est connecté au guide d'onde TEM.

b) Section de guide d'onde TEM

Contient généralement le volume d'essai.

c) Section terminaison

Normalement, la terminaison représente une résistance réelle ou équivalente qui est égale à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission (= guide d'onde TEM).

Pour la plupart des guides d'onde TEM à deux accès, les sections alimentation et terminaison sont géométriquement identiques et donc interchangeables. Un connecteur coaxial est utilisé aux deux accès. Certains guides d'onde TEM sont basés sur un système de ligne de transmission symétrique, auquel cas un transformateur SYMÉTRISEUR est nécessaire.

Tout d'abord, les guides d'onde TEM peuvent être classés en géométries fermées et ouvertes. Une géométrie est dite «fermée» lorsqu'un conducteur entoure complètement l'autre conducteur. Dans ces cas, le conducteur extérieur agit également comme un écran électromagnétique.

Ensuite, il existe des guides d'onde à un accès et à deux accès. Cette classification définit la terminaison d'un guide d'onde TEM. Normalement, le guide d'onde TEM est utilisé dans des conditions de terminaison adaptée. La manière la plus simple d'adapter un guide d'onde TEM à deux accès consiste à placer une terminaison à constantes localisées égale à l'impédance caractéristique à un accès. Dans ce cas, il est supposé que la géométrie de la ligne TEM à proximité des accès (section à transition progressive) est bien conçue pour l'adaptation à large bande (voir Figure D.4).

Pour un guide d'onde TEM à un accès, la terminaison est réalisée avec des résistances réparties et/ou une combinaison d'absorbants anéchoïques. Ce type de terminaison peut être utilisé jusqu'à plusieurs GHz dans certaines géométries. Plutôt qu'une gamme de fréquences large, un guide d'onde TEM à deux accès a l'avantage de permettre des mesures de puissances réfléchies et incidentes à l'un ou l'autre des accès.

Les conducteurs de septums peuvent être soit un fil unique, soit des fils multiples connectés en parallèle, ou une plaque unique ou des plaques multiples connectées en parallèle. Pour les systèmes à conducteurs multiples, l'amplitude et la phase d'excitation peuvent être modifiées volontairement pour faire varier la polarisation dominante à l'intérieur du volume d'essai.

Le septum peut être installé de manière symétrique ou asymétrique par rapport au conducteur extérieur. L'avantage d'un guide d'onde TEM asymétrique est un volume d'essai plus important.

D.6.2 Guides d'onde TEM ouverts (lignes ouvertes, etc.)

Un guide d'onde TEM ouvert simple peut être construit en utilisant une plaque installée sur un plan de sol conducteur. Un générateur ou un récepteur (impédance typique de 50 Ω) est connecté à un accès, et l'autre accès est adapté à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission. Une distribution tension/courant constante le long de la structure est obtenue avec une adaptation d'impédance correcte. Cette géométrie est appelée guide d'onde TEM ouvert à deux accès.

Le principal inconvénient des guides d'onde ouverts est l'énergie perdue par rapport au rayonnement. Ce rayonnement non désiré peut causer des perturbations sur le système de test du matériel. Pour les essais d'immunité à onde entretenue en particulier, un local blindé est absolument nécessaire pour le guide d'onde ouvert.

D.6.3 Guides d'onde TEM fermés (cellules TEM)

Le principal avantage des configurations de guides d'onde TEM fermés est le blindage inhérent. Tous les essais d'immunité peuvent être réalisés sans générer de perturbation sur l'environnement. Un autre avantage réside dans le fait que la cellule est un système asymétrique ne requérant pas la présence d'un symétriseur. Enfin, en général, un guide d'onde TEM n'a pas de limite en basse fréquence. Pour cette raison, les essais aux transitoires peuvent être réalisés avec des guides d'onde TEM fermés.

NOTE Pour un guide d'onde TEM à alimentation symétrique, une limitation en basse fréquence peut être introduite par le SYMÉTRISEUR.

D.7 Limitations de fréquences

Le fonctionnement d'un guide d'onde TEM est prévu à partir de l'hypothèse selon laquelle le mode TEM a une structure de champ identique à une onde plane en espace libre, sur une portion définie de la section de la cellule. Par conséquent, l'utilisation d'un guide d'onde TEM dans les essais d'émission ou d'immunité exige la propagation du mode TEM sur la gamme de fréquences utilisable.

Pour une fréquence donnée à l'intérieur de la plage de fonctionnement du guide d'onde vide, l'onde aura une section transversale de dimension qui permettra à des modes de propagation autres que le TEM de s'établir. Pour un mode non-TEM donné, le point le long de la longueur du guide d'onde pour lequel le mode peut se propager dépend de la fréquence et revient vers le point d'alimentation lorsque la fréquence croît. Le mode non-TEM d'ordre le plus faible (normalement TE_{10}) peut se propager lorsqu'une dimension de la section transversale du guide d'onde dépasse la moitié de la longueur d'onde en espace libre à cette fréquence. Les modes d'ordre plus élevé sont lancés initialement par la conversion de mode à partir du mode TEM. La conversion d'énergie entre deux modes est provoquée par des irrégularités dans la structure du guide d'onde qui peuvent se coupler aux deux modes.

Dans la pratique, beaucoup de guides d'onde TEM ouverts et fermés incluent un certain type d'absorbants anéchoïques en mousse ou en ferrite pour réduire ou enlever les modes d'ordre supérieur et les distributions de champs résonants qui ne se propagent pas. Dans le cas d'une installation dans des locaux adaptés en termes de distribution de champ modal, les caractéristiques du mode TEM peuvent être essentiellement préservées. Généralement, avec la combinaison correcte de la charge en absorbants et de la transition des conducteurs d'entrée/sortie, de nombreux guides d'onde TEM fonctionneront en mode TEM jusqu'à des fréquences de plusieurs GHz ou plus. Le placement correct d'absorbants est déterminé par les formes des sections d'entrée/sortie et celle de la section du volume d'essai. L'inconvénient pour beaucoup de guides d'onde TEM avec revêtement par absorbants dans la section du volume d'essai, est que le facteur de champ e_{0y} (voir A.3.2.3.3) utilisé dans

l'algorithme de corrélation d'émissions, ne peut plus être calculé de manière analytique. Ceci peut conduire à des incertitudes de mesure plus élevées.

Pour tout guide d'onde TEM avec ou sans absorbant, la gamme de fréquences valide doit être établie en utilisant les méthodes décrites dans la présente norme (voir 5.2.1 et 5.3.2).

Des informations supplémentaires sur l'homogénéité de champ et la fréquence résonante sont données en [17] et [19]. Pour les guides d'onde TEM sans absorbant, les fréquences résonantes dépendent de la géométrie du guide d'onde TEM. Dans une cellule TEM à deux accès, ces fréquences interviennent entre une certaine section transversale de la section d'alimentation et de la section de terminaison, appelées positions de coupure z_c . Chaque mode d'ordre supérieur a une autre position de coupure, en fonction du type de mode. Entre l'accès et la position de coupure, le mode de champ n'est pas en mesure de se propager. Une résonance intervient si la distance entre les deux positions de coupure est un multiple de la demi-longueur d'onde. Pour des raisons de symétrie, le champ résonant doit avoir un maximum ou être nul au milieu de la cellule à $z = z_{\text{sym}}$. Les fréquences résonantes des modes de champs peuvent être calculées analytiquement par

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{n+1}{2} \cdot \pi - \arctan\left(\frac{K_3}{K_4}\right)}{z_{\text{sym}}} \right)^2 + k_c^2(z_{\text{sym}})} \quad (\text{D.8})$$

avec $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ et $K_3, K_4 = f(z, a, k, k_c, J_V)$ et $k_c = f(z_c, a, \text{mode})$.

Les constantes K_1 à K_4 peuvent être résolues de manière analytique. K_1 est choisie égale à 1. Par conséquent K_2 vaut 0. K_3 et K_4 peuvent être écrites selon:

$$\begin{pmatrix} K_3 \\ K_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \cos\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) & -\sin\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) \\ -\frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \sin\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) & \cos\left(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}\right) \end{pmatrix} \quad (\text{D.9})$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{a' z_k} \cdot J_V(k z_k) \\ \frac{a' - 2\nu a'}{2\sqrt{a' z_k}} \cdot J_V(k z_k) + \sqrt{a' z_k} \cdot J_{V-1}(k z_k) \end{pmatrix}$$

Pour les détails, voir [19].

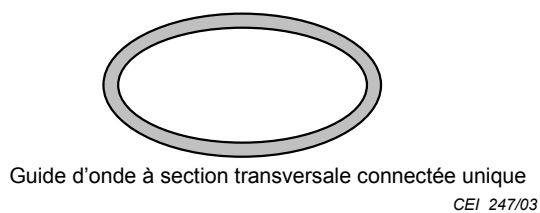


Figure D.1 – Guide d'onde simple (pas de mode TEM)

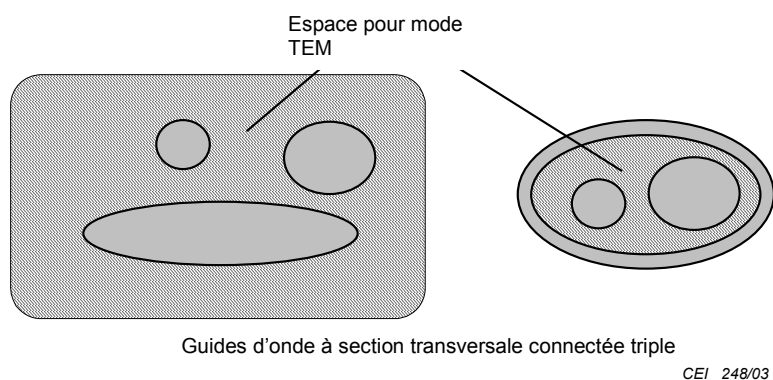


Figure D.2 – Guides d'onde pour propagation en mode TEM

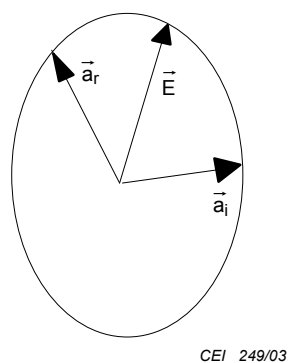


Figure D.3 – Vecteur polarisation

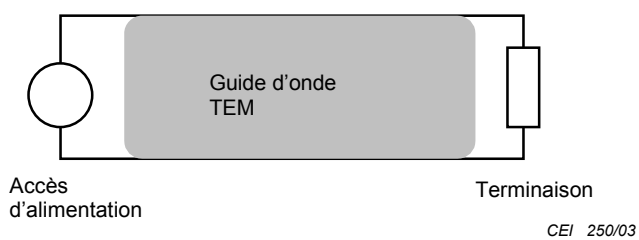


Figure D.4 – Modèle de ligne de transmission pour propagation TEM

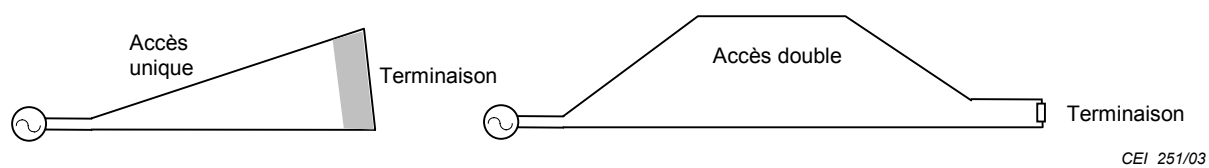


Figure D.5 – Guides d'onde TEM à un ou deux accès

Annexe E (informative)

Méthode d'étalonnage pour les sondes de champ électrique dans les guides d'onde TEM

E.1 Description générale

Les sondes de champ électrique à large gamme de fréquences et à réponse dynamique élevée sont très souvent utilisées dans les procédures de validation de l'uniformité des champs conformément à la présente norme. Entre autres aspects, la qualité de l'étalonnage de la sonde de champ a un impact direct sur le budget d'incertitude d'un essai d'immunité aux perturbations rayonnées.

Généralement, en fonction de l'essai d'immunité aux perturbations rayonnées réalisé, les sondes peuvent être soumises à des valeurs de champs jusqu'à 200 V/m, voire plus, pendant la validation de l'uniformité de champ conformément à la présente norme. Par conséquent, il convient que l'étalonnage des sondes de champs électriques utilisées dans la présente norme tienne compte des gammes de fréquences et de dynamiques prévues.

Actuellement, les résultats de l'étalonnage d'une sonde présentent des différences lorsque celle-ci est étalonnée dans des laboratoires différents. Par conséquent, l'environnement et la méthode d'étalonnage de la sonde de champ doivent être spécifiés. Cette annexe fournit les procédures de validation des guides d'ondes TEM à utiliser pour l'étalonnage des sondes et fournit les informations pertinentes sur l'étalonnage des sondes à utiliser dans la présente norme, mesures d'uniformité de champ, afin de limiter ces différences de résultats de validation.

E.2 Exigences pour l'étalonnage des sondes

E.2.1 Généralités

Il convient que l'étalonnage des sondes de champ électrique destinées à être utilisées pour la procédure de validation UFA (zone de champ uniforme)¹⁵ telle qu'elle est définie dans la présente norme satisfasse aux exigences suivantes. La zone de champ uniforme est un plan vertical hypothétique de l'étalonnage de champ dans lequel les variations acceptables sont relativement faibles.

E.2.2 Gamme de fréquences d'étalonnage

Il convient que la gamme de fréquences couvre normalement les fréquences les plus élevées spécifiées par la taille et la structure du guide d'onde TEM. Il convient que la plus grande dimension de la tête de sonde d'une sonde de champ électrique, l_{pmax} , soit inférieure au quart de la longueur d'onde à la fréquence d'étalonnage maximale, f_{cmax} , de manière à éviter toute approche de la résonance. Par conséquent, la fréquence maximale est donnée par la dimension de la tête de sonde sous la forme

$$f_{max} \leq \frac{c_0}{4l_{pmax}} \quad (E.1)$$

où c_0 est la vitesse de la lumière.

¹⁵ Uniform Field Area

Par exemple, lorsque la plus grande dimension de la tête de sonde de champ électrique l_{pmax} , est égale à 2,5 cm, la fréquence maximale est égale à 3 GHz, valeur dérivée de l'Equation (E.1). Si la fréquence dépasse la fréquence maximale déterminée par la vérification du mode TEM décrite dans en 5.2.1, l'étalonnage est effectué jusqu'à la fréquence maximale déterminée par la vérification dudit mode.

E.2.3 Volume d'étalonnage

Il convient que les dimensions du volume d'étalonnage, qui seront aussi régulières que possible, ayant par exemple la forme d'un cube ou d'un parallélépipède, soient inférieures à 20 % de la distance entre les conducteurs intérieur et extérieur (hauteur du septum). Il convient de positionner le centre du volume où une sonde de champ peut être étalonnée à mi-hauteur du septum.

Il convient d'effectuer la validation du volume d'étalonnage aux points de quadrillage du cube. On choisit un intervalle de quadrillage d'environ 10 % de la hauteur du septum entre deux points d'étalonnage. Il convient que la sonde ou le capteur de champ électrique utilisé(e) pour la validation soit la ou le plus petit(e) possible. Il n'est pas nécessaire d'effectuer un étalonnage de la sonde ou du capteur.

NOTE 1 Lorsque les dimensions du volume d'étalonnage correspondent à un cube de 20 cm, l'intervalle de quadrillage est de 10 cm et le nombre de points de mesure est de 27, tel qu'illustré à la Figure E.1.

La procédure de validation du volume est la suivante:

- les champs électriques sont mesurés à tous les points qui utilisent la méthode de puissance incidente constante mentionnée en 5.2.3. Il convient de sélectionner les fréquences tel que mentionné en E.2.6;
- un écart-type des champs électriques mesurés est calculé;
- il convient que l'écart-type soit inférieur à environ 1 dB pour un guide d'onde TEM à un accès et à 0,6 dB pour un guide d'onde TEM à deux accès.

NOT 2 La base de calcul de ces écarts types est mentionnée en [51]

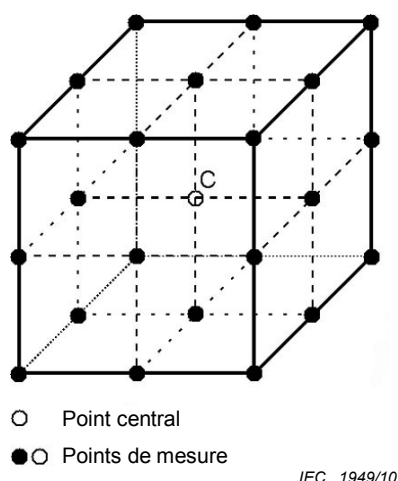


Figure E.1 – Exemple des points de mesure pour la validation

E.2.4 Dimensions des sondes

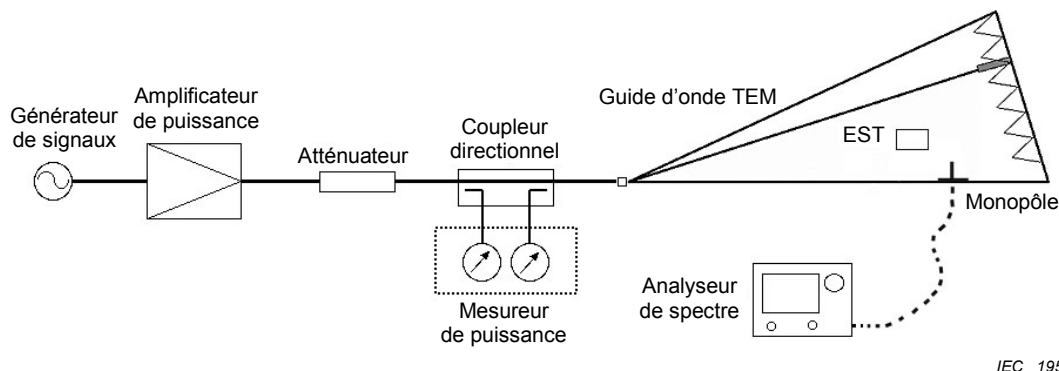
Il convient que les dimensions de la tête de sonde soient inférieures à 10 % de la distance entre les conducteurs intérieur et extérieur (hauteur du septum), h (voir 5.2.3). Il convient

également que les dimensions de la sonde soient inférieures au volume d'étalonnage (voir E.2.3).

E.2.5 Perturbations du guide d'onde TEM dues à la sonde

Il convient de valider la perturbation d'un guide d'onde TEM due à la sonde, incluant l'appareil de mesure avec et sans la sonde.

NOTE La perturbation dépend non seulement de la perturbation provoquée par l'appareil de mesure, mais également de la linéarité du guide d'onde TEM.



IEC 1950/10

Figure E.2 – Montage de validation de la perturbation

Un exemple de montage de mesure utilisé pour la validation est illustré à la Figure E.2. Il convient, comme dans le cas de l'étalonnage d'une sonde, de connecter un amplificateur de puissance, un générateur de signaux, un coupleur directionnel et un mesureur de puissance à un guide d'onde TEM. Une antenne monopôle est utilisée pour la détection du champ électrique. Un petit orifice est percé dans la plaque de sol afin d'y fixer l'antenne. Un capteur de champ électrique moins pénétrant, par exemple un capteur de champ électrique optique utilisant un cristal électro-optique LiNbO_3 , est également disponible en remplacement de l'antenne monopôle. Il n'est pas nécessaire de percer un orifice en cas d'utilisation du capteur. Il n'est pas nécessaire d'étalonner l'antenne/capteur. L'antenne monopôle est connectée à un analyseur de spectre pour mesurer la sortie de l'antenne. Un cube métallique ayant les dimensions du volume d'étalonnage peut être utilisé comme sonde.

La procédure de validation de la perturbation est la suivante:

- définir une fréquence sans sonde et appliquer la puissance incidente à un guide d'onde TEM;
- mesurer le niveau de puissance et la valeur lue d'un analyseur de spectre;
- augmenter la puissance et répéter b);
- modifier la fréquence (voir E.2.6) et répéter de a) à c);
- lorsque la mesure est effectuée pour toutes les fréquences, ajouter la sonde et répéter de a) à d);
- vérifier la perturbation de la valeur lue par rapport à la puissance d'entrée.

Il convient que la différence entre la perturbation avec la sonde et celle sans ladite sonde soit inférieure à l'incertitude de mesure générée par le mesureur de puissance et l'analyseur de spectre.

NOTE Voir [52] et [53] pour déterminer l'incertitude. Certains fabricants d'appareil de mesure spécifient l'incertitude de mesure de l'appareil.

E.2.6 Paliers de fréquence

Il est nécessaire d'utiliser des fréquences fixes d'étalonnage pour être en mesure de comparer les résultats d'essai entre différents laboratoires d'étalonnage (voir Tableau E.1).

Tableau E.1 – Fréquences d'étalonnage

Gamme de fréquences	Fréquences d'étalonnage types MHz
f_0 à 1 GHz	f_0 , 50, 100, 150, 200, ..., 950, 1 000
Au-dessus de 1 GHz	1 000, 1 200, 1 400, ...
NOTE f_0 est la fréquence la plus faible de la sonde soumise à étalonnage.	

E.2.7 Amplitude du champ

Il convient que l'amplitude du champ à laquelle une sonde est étalonnée soit fondée sur l'amplitude du champ exigée pour l'essai d'immunité. Comme la méthode préférentielle de validation de l'uniformité de champ est appliquée avec une amplitude de champ d'au moins 1,8 fois l'amplitude de champ à appliquer à l'EST, il est recommandé que l'étalonnage de sonde soit réalisé à une valeur égale au double de l'amplitude de champ d'essai comme le montre le Tableau E.2.

NOTE Ceci couvre également l'exigence de compression de 1 dB de l'amplificateur de puissance.

Tableau E.2 – Niveau de l'amplitude de champ d'étalonnage

Niveau d'étalonnage	Amplitude du champ d'étalonnage V/m
1	2
2	6
3	20
4	60
X	Y
NOTE X , Y est un niveau d'étalonnage ouvert. Ce niveau peut être indiqué dans la spécification de produit ou par le laboratoire d'essai.	

E.3 Exigences pour les instruments d'étalonnage

E.3.1 Spécifications du guide d'onde TEM

Un guide d'onde TEM peut être utilisé pour établir les champs normalisés pour les étalonnages de la sonde de champ. Le champ au centre d'une cellule TEM entre le septum et la plaque haute ou basse est calculé à partir de:

$$E_{\text{approx}} = \frac{\sqrt{Z_0 P_{\text{net}}}}{h} \quad \text{en V/m} \quad (\text{E.2})$$

où

Z_0 est l'impédance caractéristique de la cellule TEM (typiquement 50 Ω),

P_{net} est la puissance nette en watts déterminée selon E.3.4,

h est la distance de séparation entre le septum et la plaque haute ou basse (en m).

NOTE 1 Le champ situé à mi-distance entre les deux conducteurs est calculé par approximation à l'aide de l'Equation (E.2).

NOTE 2 L'Equation (E.2) est valable uniquement pour le mode TEM.

Il convient que le ROS de la cellule TEM soit maintenu à une valeur peu élevée, par exemple moins de 1,3 pour réduire les incertitudes de mesure.

Une méthode alternative de mesure de P_{net} consiste à utiliser un atténuateur étalonné à faible ROS et un détecteur de puissance connecté à l'accès de sortie du guide d'onde TEM (guide d'onde TEM à deux accès uniquement).

E.3.2 Harmoniques et signaux parasites

Il convient que tout harmonique ou signal parasite provenant des amplificateurs de puissance soit inférieur d'au moins 20 dB au niveau de la fréquence porteuse. Ceci est exigé pour tous les niveaux de champ utilisés pendant l'étalonnage et la vérification de la linéarité. Dans la mesure où le contenu harmonique des amplificateurs de puissance est généralement plus mauvais à des niveaux de puissance supérieurs, il est admis de réaliser la mesure des harmoniques uniquement à la valeur la plus élevée du champ d'étalonnage. La mesure d'harmoniques peut être réalisée en utilisant un analyseur de spectre étalonné qui est connecté à la sortie de l'amplificateur par l'intermédiaire d'un atténuateur ou d'un coupleur directionnel.

Il convient que les laboratoires d'étalonnage réalisent une mesure pour valider le fait que les signaux harmoniques et/ou parasites provenant de l'amplificateur satisfont aux exigences pour tous les montages de mesure. Ceci peut être réalisé en connectant un analyseur de spectre à l'accès 3 du coupleur directionnel (en remplaçant la sonde du mesureur de puissance par l'entrée de l'analyseur de spectre, voir Figure E.3).

NOTE Il convient de s'assurer que le niveau de puissance ne dépasse pas la puissance d'entrée maximale admissible de l'analyseur de spectre. Il est permis d'utiliser un atténuateur.

Il convient que l'étalement de la fréquence couvre au moins le troisième harmonique de la fréquence prévue. Il convient de réaliser la mesure de validation au niveau de puissance qui générera l'amplitude de champ prévue la plus élevée. Des filtres de suppression d'harmoniques peuvent être utilisés pour améliorer la pureté spectrale du ou des amplificateurs de puissance.

NOTE "Fréquence prévue" signifie la fréquence maximale à étalonner.

E.3.3 Fixation de la sonde

La fixation de la sonde peut causer des réflexions de champs électromagnétiques au cours de l'étalonnage de la sonde. Il convient que le support de fixation soit constitué d'un matériau ayant une permittivité relative inférieure à 1,2 et une tangente de pertes diélectriques δ inférieure à 0,005.

E.3.4 Mesure de la puissance nette fournie à un dispositif d'émission en utilisant des coupleurs directionnels

La puissance nette fournie à un dispositif d'émission peut être mesurée avec un coupleur bidirectionnel à 4 accès ou avec deux coupleurs monodirectionnels à 3 accès connectés dos à dos (formant le coupleur dit «directionnel double»). Un montage fréquent utilisant un coupleur bidirectionnel pour mesurer la puissance nette fournie à un dispositif d'émission est représenté à la Figure E.3. Le couplage incident, le couplage réfléchi sont définis selon les équations suivantes, lorsque chaque accès est connecté à une charge adaptée et à une source adaptée:

$$C_{\text{fwd}} = \frac{P_3}{P_1} \quad (\text{E.3})$$

$$C_{\text{rev}} = \frac{P_4}{P_2} \quad (\text{E.4})$$

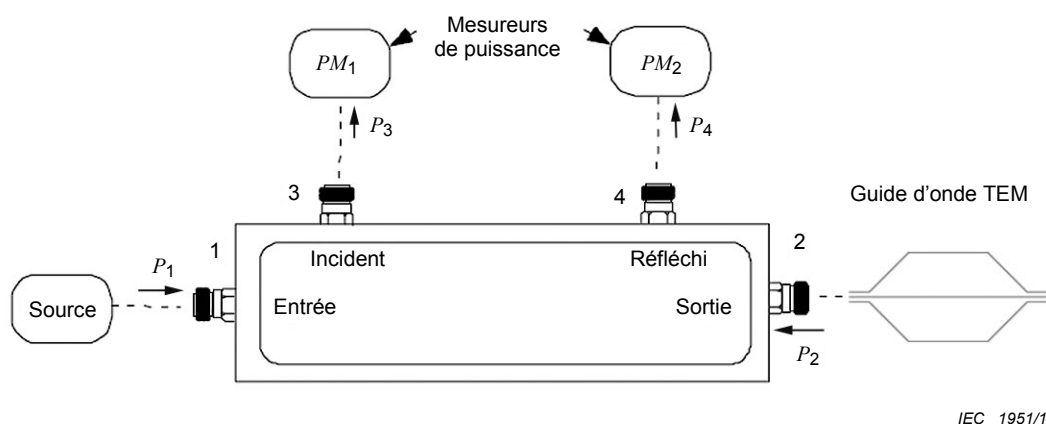
où P_1 , P_2 , P_3 , et P_4 sont les puissances respectives à chaque accès du coupleur directionnel.

La puissance nette fournie au dispositif d'émission est donc:

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1}{C_{\text{fwd}}} - \frac{PM_2}{C_{\text{rev}}} \quad (\text{E.5})$$

où PM_1 et PM_2 sont les valeurs lues sur le mesureur de puissance en unités linéaires.

Lorsque le ROS du guide d'onde TEM est connu, un coupleur unique à trois accès peut alors être utilisé. Par exemple, un guide d'onde TEM avec un ROS de 1,5 équivaut à un coefficient de réflexion de tension (VRC¹⁶) de 0,2.



IEC 1951/10

Figure E.3 – Montage pour la mesure de la puissance nette vers un dispositif d'émission

¹⁶ Voltage Reflection Coefficient

La précision est affectée par la directivité du coupleur. La directivité est une mesure de l'aptitude du coupleur à isoler les signaux incident et réfléchi. Pour un dispositif d'émission bien adapté, la puissance réfléchie est bien plus faible que la puissance incidente. L'effet de la directivité est, par conséquent, moins important que dans une application de réflectivité. Par exemple, lorsque le guide d'onde TEM a un ROS de 1,5 et lorsque le coupleur a une directivité de 20 dB, l'incertitude maximale absolue de la puissance nette due à la directivité finie est de 0,22 dB - 0,18 dB = 0,04 dB avec une distribution en U (où 0,22 dB est la perte de puissance apparente incidente due au ROS de 1,5).

La puissance nette fournie au dispositif d'émission est donc:

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1(1 - VCR^2)}{C_{\text{fwd}}} \quad (\text{E.6})$$

E.4 Etalonnage de la sonde de champ

E.4.1 Méthodes d'étalonnage

Bien que trois méthodes d'étalonnage soient spécifiées en [53], deux méthodes sont généralement utilisées. La méthode de champ normalisé utilisant les amplitudes de champs calculées est employée pour un guide d'onde TEM à deux accès (voir E.4.2). La méthode d'étalonnage qui utilise l'étalon de transfert (c'est-à-dire un capteur ou une sonde de champ similaire à celui ou à celle faisant l'objet de l'étalonnage) est employée pour un guide d'onde TEM à un accès.

E.4.2 Procédure d'étalonnage dans le cas d'un guide d'onde TEM à deux accès

La méthode de champ normalisé peut être appliquée pour l'étalonnage de la sonde dans le cas d'un guide d'onde de cette nature. La Figure E.4 montre un exemple de montage pour l'étalonnage d'une sonde de champ électrique. Si le niveau de champ électrique et les puissances incidente et réfléchie font l'objet d'une lecture manuelle, il n'est pas nécessaire d'utiliser un ordinateur. Il convient de choisir la procédure d'étalonnage selon le type de guide d'onde TEM. La procédure d'étalonnage à appliquer dans le cas d'un guide d'onde TEM à deux accès se présente comme suit:

- a) positionner le capteur de champ électrique isotrope à mi-hauteur du septum;
- b) appliquer une puissance incidente à l'accès d'entrée du guide d'onde TEM de manière à ce que l'amplitude du champ électrique de la composante de champ primaire soit comprise entre 6 V/m et 20 V/m, sur la gamme de fréquences spécifiée en E.2.2 en paliers de fréquences spécifiés en E.2.6, et enregistrer toutes les valeurs lues de puissances incidente et réfléchie, et de champs de composantes primaires et secondaires;
- c) calculer la puissance nette, P_{net} , à l'aide de l'Equation (E.5) ou (E.6) et des puissances mesurées;
- d) calculer l'amplitude de champ électrique primaire nominale à l'aide de l'Equation (E.2) sous la forme E_{approx} .

NOTE Le facteur d'étalonnage peut varier en fonction de la méthode d'installation de la sonde. Il existe également une méthode qui permet d'insérer uniquement une tête de sonde de la partie supérieure d'un guide d'onde TEM, de manière à neutraliser l'influence de tous éléments éventuels autres que la tête de sonde.

Le facteur d'étalonnage, F_p , peut être obtenu sous la forme suivante

$$F_p = \frac{E_m}{E_{\text{approx}}}, \text{ ou } F_p = E_m - E_{\text{approx}} \quad \text{en dB} \quad (\text{E.7})$$

où E_m est l'amplitude de champ primaire mesurée.

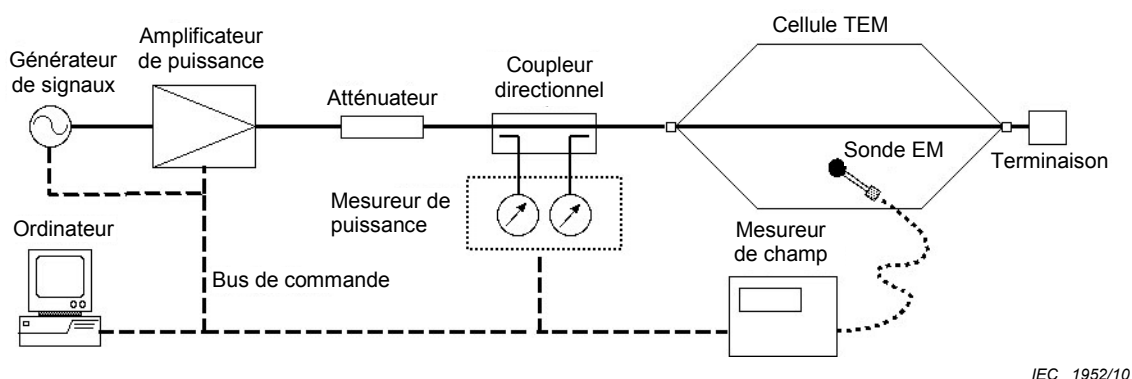


Figure E.4 – Exemple de montage d'étalonnage d'une sonde de champ électrique

E.4.3 Procédure d'étalonnage dans le cas d'un guide d'onde TEM à un accès

E.4.3.1 Méthode de transfert

Généralement, les écarts de l'amplitude de champ électrique mesurée par rapport à l'amplitude de champ donnée par l'Equation (E.2) sont de l'ordre de $\pm 0,5$ dB pour toutes les fréquences dans le cas d'un guide d'onde TEM à deux accès. Toutefois, les écarts peuvent être de ± 3 dB ou ± 4 dB dans le cas d'un guide d'onde TEM à un accès. Par conséquent, il convient de ne pas utiliser la méthode d'étalonnage mentionnée en E.4.2 dans le guide d'onde TEM à un accès. Dans ce cas, l'étalonnage peut être effectué à l'aide de la méthode de transfert.

Une sonde de transfert peut être utilisée pour établir des champs normalisés dans un dispositif de génération de champs (dispositif standard). La réponse de la sonde de transfert peut être déterminée soit par des calculs théoriques (pour les sondes comme les dipôles) soit par les étalonnages effectués selon certaines méthodes (par exemple une méthode à trois antennes dans une chambre anéchoïque peut être utilisée). Une autre méthode consiste à utiliser une cellule TEM à deux accès de petite taille (pour permettre une fréquence supérieure élevée). Cette méthode nécessite bien entendu que la sonde de transfert soit suffisamment petite. Une fois que la fonction de transfert du dispositif standard est connue, l'étalonnage de la sonde peut être effectué à des niveaux de puissance différents, à condition que le dispositif standard soit linéaire. Il convient de noter la possibilité d'erreurs supplémentaires dues à la différence observée dans les environnements d'étalonnage (par exemple emplacement d'étalonnage, taille, orientation) pour les étalons de transfert ainsi qu'aux différences de formes observées entre l'étalon de transfert et la sonde en étalonnage.

NOTE 1 Généralement, toute différence observée dans l'environnement d'étalonnage entre l'étalonnage de référence et l'application réelle dans un laboratoire d'étalonnage donne lieu à des erreurs systématiques. Par ailleurs, dans l'idéal, il convient que l'étalon de transfert utilisé dans un laboratoire d'étalonnage ait la même géométrie et la même construction que la sonde soumise à étalonnage. Dans le cas contraire, les erreurs systématiques supplémentaires générées doivent être quantifiées.

La procédure de réalisation de l'étalonnage à l'aide de la sonde de transfert est la suivante:

- a) positionner la sonde de transfert à mi-hauteur du septum;
- b) appliquer une puissance incidente à l'accès d'entrée du guide d'onde TEM sur la gamme de fréquences spécifiée en E.2.2, en paliers de fréquences spécifiés en E.2.6, et enregistrer toutes les valeurs lues de puissance incidente et réfléchie, et de champs de composantes primaires (ou la tension de sortie de la sonde de transfert);

NOTE 2 Si les tensions de sortie sont mesurées, il convient de les convertir en valeur de champ électrique.

- c) calculer la puissance nette, P_{net} , à l'aide de l'Equation (E.5) ou (E.6) et les puissances mesurées;

- d) remplacer la sonde de transfert par le capteur d'amplitude de champ électrique isotrope à étalonner;
- e) appliquer une puissance incidente de sorte que la puissance nette soit identique à la puissance spécifiée dans le cas défini en b), et enregistrer les valeurs lues de champ primaire.

Le facteur d'étalonnage, F_p , peut être obtenu sous la forme

$$F_p = \frac{E_m}{E_T}, \text{ ou } F_p = E_m - E_T \text{ en dB} \quad (\text{E.8})$$

où E_T est l'amplitude de champ primaire obtenue par la sonde de transfert.

La méthode de transfert est précise si les conditions suivantes sont satisfaites:

- le montage n'est pas modifié entre les procédures de transfert et d'étalonnage;
- la position de la sonde au cours des mesures est reproduite;
- la puissance émise reste la même;
- la sonde en essai est similaire en construction (taille et conception d'élément) à la sonde de transfert;
- les câbles connectant la tête du capteur et la lecture ne perturbent pas et ne captent pas le champ;
- le dispositif standard est largement anéchoïque.

Les références [54] et [55] fournissent plus d'informations concernant cette méthode.

E.4.3.2 Méthode d'estimation du champ électrique à la position d'étalonnage

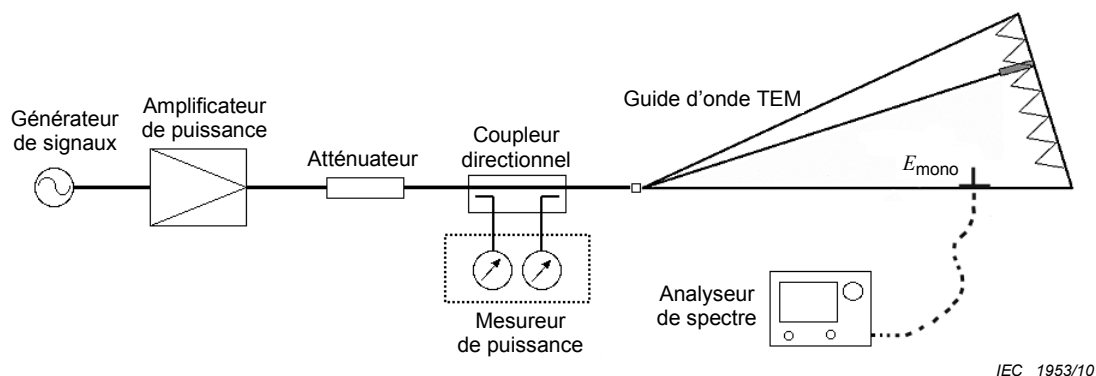
En l'absence de sonde de transfert, une sonde peut être étalonnée à l'aide d'une autre méthode. Une antenne de monopôle mentionnée en E.2.5 est utilisée (voir Figure E.5). La procédure d'étalonnage est la suivante:

- a) positionner l'antenne de monopôle sur la plaque de sol;
- b) appliquer la puissance incidente à l'accès d'entrée du guide d'onde TEM sur la gamme de fréquences spécifiée en E.2.2, en paliers de fréquences spécifiés en E.2.6, et enregistrer toutes les valeurs de puissances incidente et réfléchie, ainsi que les valeurs lues de l'analyseur de spectre, P_{mono} ;
- c) calculer l'amplitude du champ électrique à la position de l'élément monopolaire, E_{mono} , en utilisant le facteur d'antenne de l'antenne;
- d) calculer la puissance nette, P_{net} , à l'aide de l'Equation (E.5) ou (E.6) et des puissances mesurées;
- e) retirer le monopôle, puis positionner le capteur de champ électrique de petite taille (par exemple capteur de champ électrique optique) à l'emplacement antérieur de l'élément monopolaire;
- f) appliquer une puissance incidente de sorte que la puissance nette soit identique à la puissance spécifiée dans le cas défini en b), enregistrer la valeur de champ primaire ou les valeurs lues de l'analyseur de spectre par le capteur (E_M ou P_M);

NOTE Il n'est pas nécessaire d'effectuer un étalonnage du capteur de champ électrique de petite taille. Bien que la sonde de champ électrique puisse être appliquée, il convient de ne pas utiliser la sonde devant faire l'objet de l'étalonnage.

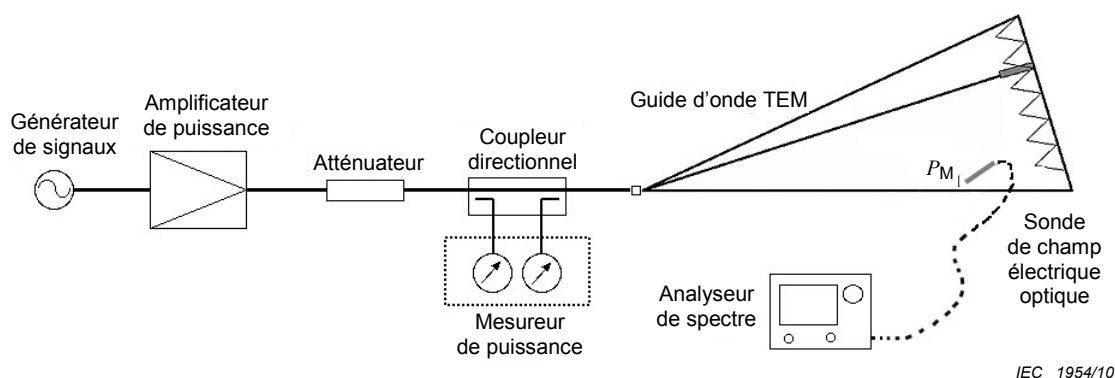
- g) positionner le capteur de champ électrique de petite taille à l'emplacement d'étalonnage (normalement à mi-hauteur du septum);

- h) appliquer une puissance incidente de sorte que la puissance nette soit identique à la puissance spécifiée dans le cas défini en b), et enregistrer la valeur de champ primaire ou les valeurs lues de l'analyseur de spectre par le capteur (E_C ou P_C).



IEC 1953/10

Figure E.5a – Utilisation d'un monopôle



IEC 1954/10

Figure E.5b – Utilisation d'un petit détecteur de champ électrique

Figure E.5 – Montage d'étalonnage de la sonde de champ électrique à l'aide d'une autre méthode

Le champ électrique de référence peut être calculé sous forme de l'équation suivante.

$$E_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{mono}} \sqrt{P_C}}{\sqrt{R_M}}$$

ou

$$E_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{mono}} E_C}{E_M} \quad (\text{E.9})$$

Le facteur d'étalonnage, F_p , peut être obtenu sous la forme

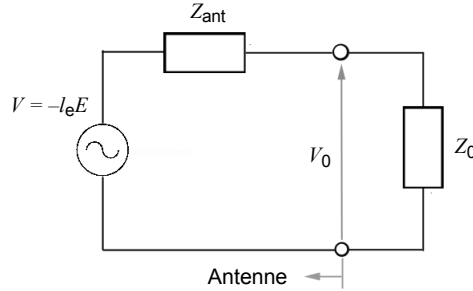
$$F_p = \frac{E_m}{E_{\text{ref}}}, \text{ ou } F_p = E_m - E_{\text{ref}} \text{ en dB} \quad (\text{E.10})$$

où E_m est l'amplitude de champ primaire obtenue par une sonde soumise à essai.

La procédure d'utilisation du facteur d'antenne de l'antenne monopolaire est énoncée en E.4.3.3.

E.4.3.3 Calcul du facteur d'antenne à partir de l'impédance de l'antenne en utilisant une longueur équivalente

L'impédance de l'antenne peut être obtenue en mesurant le coefficient de réflexion de l'antenne à l'aide d'un analyseur de réseau, ou au moyen d'un calcul utilisant l'équation de Labus [56] ou en utilisant les autres méthodes numériques telles que la méthode des moments.



IEC 1955/10

Figure E.6 – Circuit équivalent de l'antenne et de l'appareil de mesure

Le circuit équivalent d'une antenne de réception et d'un appareil de mesure est illustré à la Figure E.6. La tension aux bornes de l'antenne, V_0 , est obtenue sous la forme

$$V_0 = \frac{Z_0 V}{Z_0 + Z_{\text{ant}}} = - \frac{Z_0 I_e E}{Z_0 + Z_{\text{ant}}} \quad (\text{E.11})$$

où Z_0 et Z_{ant} représentent l'impédance caractéristique de l'appareil et l'impédance de l'antenne, respectivement. E désigne le champ électrique à l'emplacement de l'élément de l'antenne.

I_e désigne la longueur utile de l'antenne, calculée comme suit

$$I_e = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \int_0^l \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx = \frac{\lambda}{2\pi \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \quad \left(l \leq \frac{\lambda}{4} \right) \quad (\text{E.12})$$

$$I_e = \frac{\lambda}{2\pi} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \quad \left(\frac{\lambda}{4} \leq l < \frac{\lambda}{2} \right) \quad (\text{E.13})$$

où l et λ représentent la longueur de l'élément constitutif de l'antenne et la longueur d'onde, respectivement.

Le facteur d'antenne, AF , est exprimé par le champ électrique et la tension aux bornes comme suit.

$$AF = \frac{E}{V_0} \quad (\text{E.14})$$

Le facteur d'antenne est obtenu à partir de (E.11) et (E.14) sous la forme

$$AF = \frac{Z_0 + Z_{\text{ant}}}{Z_0 I_e} \quad (\text{E.15})$$

Bibliographie

Normes contenant des guides d'onde TEM

ANSI C63.4, *Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*

ANSI C63.19-2007, *Methods of Measurement of Compatibility between Wireless Communication Devices and Hearing Aids*

CISPR 20, *Récepteurs de radiodiffusion et de télévision et équipements associés – Caractéristiques d'immunité – Limites et méthodes de mesure*

CISPR 25, *Véhicules, bateaux et moteurs à combustion interne – Caractéristiques des perturbations radioélectriques – Limites et méthodes de mesure pour la protection des récepteurs embarqués*

EIA/TIA-631, *Telecommunications Telephone Terminal Equipment – Radio Frequency Immunity Requirements for Equipment Having an Acoustic Output*

ETSI TR 102 273-5, *Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM); Improvement on Radiated Methods of Measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties – Part 5: Striplines*

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

CEI 60118-13, *Electroacoustique – Appareils de correction auditive – Partie 13: Compatibilité électromagnétique (CEM)*

CEI 60489-1, *Méthodes de mesure applicables au matériel de radiocommunication utilisé dans les services mobiles – Partie 1: Définitions générales et conditions normales de mesure*

CEI 60489-3, *Méthodes de mesure applicables au matériel de radiocommunication utilisé dans les services mobiles – Partie 3: Récepteurs conçus pour les émissions A3E ou F3E*

CEI 61967-2, *Circuits intégrés – Mesure des émissions électromagnétiques, 150 kHz à 1 GHz – Partie 2: Mesure des émissions rayonnées – Méthode de cellule TEM et cellule TEM à large bande*

CEI 62132-2, *Circuits intégrés – Mesure de l'immunité électromagnétique – Partie 2: Mesure de l'immunité rayonnée – Méthode de cellule TEM et cellule TEM à large bande*

IEEE Std C95.3, *IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields – RF and microwave*

IEEE Std 1309-2005, *IEEE Standard for Calibration of electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*

IEEE Std 145-1993, *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*

IEEE Std 211-1997, *IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation*

ISO 11452 (toutes les parties), *Véhicules routiers – Méthodes d'essai d'un équipement soumis à des perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique en bande étroite*

ISO 11452-3, *Véhicules routiers – Méthodes d'essai d'un équipement soumis à des perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique en bande étroite – Partie 3: Cellule à mode électromagnétique transverse (TEM)*

MIL-STD 461F, *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*

Document de référence

- [1] M. Alexander, A. Nothofer, R.C. Dixon, "The use of ferrite clamps and clip-on ferrites," CISPR/A-TC77 (JTF-TEM-Alexander-Nothofer-Dixon) 01-01, June 2001
- [2] ANSI C63.4-2000, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Dec. 2000
- [3] T.M. Babij, "Evaluation of errors in the calibration of TEM cells," *IEEE Miami Technicon '87*, Miami, FL, pp. 199-201, 1987
- [4] A. Beggio, G. Borio, and R.E. Zich, "On the unwanted effects on the radiated emission and susceptibility measurements due to the introduction of a wooden table," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp.252-255, May 1999
- [5] S. Bentz, "Use of the TEM cell for compliance testing of emission and immunity, an IEC perspective," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 43-47, 1996
- [6] H.S. Berger, and A. Tsaliovich, "Unlicensed PCS product EMC compliance measurement rational and alternatives," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, CA, pp. 396-401, 1996
- [7] J. van Bladel, *Electromagnetic Fields*, Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [8] Ch. Braun, W. Graf, P. Guidi, H.U. Schmidt "Beeinflussung der Stromverteilung auf Testobjekten in TEM-Wellenleitern bei Variation des Füllfaktors," (translation: "Influence of current distribution on test objects in TEM waveguides for variable object size"), *Kleinheubach Symposium of URSI German NC and ITG*, Kleinheubacher Berichte, Deutsche Telekom, Darmstadt, Germany, vol. 39, 1996
- [9] E.L. Bronaugh, "Simplifying EMI immunity (susceptibility) tests in TEM cells," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, D.C., pp. 488-491, August 1990
- [10] E. Bronaugh, and J. Osburn, "Radiated emissions test performance of the GHz TEM cell," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Cherry Hill, NJ, pp. 1-7, Aug. 1991
- [11] CISPR 14 (toutes les parties), *Compatibilité électromagnétique – Exigences pour les appareils électrodomestiques, outillages électriques et appareils analogues*
- [13] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., *IEEE Press*, Piscataway, NJ, 1991
- [14] M. Crawford, and J. Workman, "Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Baltimore, MD, pp. 80-85, 1980
- [15] H. Garbe, H. Haase, M. Koch, "Specification of alternative test sites with respect to given EMC field standards," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 459-464, Feb. 1997

- [16] J. Glimm, K. Münter, M. Spitzer, Th. Dötzer, Th. Schrader, "Influence of calibration and measurement techniques on the inhomogeneity of electromagnetic fields for immunity tests," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Tokyo, Japan, pp. 600-603, May 1999
- [17] C. Groh, J.P. Kaerst, M. Koch, and H. Garbe, "TEM Waveguides for EMC measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 440-445, Nov. 1999
- [18] C. Groh, J.P. Kaerst, and H. Garbe, "Einfluss der Beladung auf die Feldmoden in TEM Wellenleitern," (translation: "Influence of load on field modes in TEM waveguides"), *Elektromagnetische Verträglichkeit EMV 2000 (8. Intl. Symp. and Exhb. on EMC)*, VDE Verlag, Berlin, Germany, pp. 287-294, Feb. 2000, ISBN 3-8007-2522-3
- [19] C. Groh, *TEM Zellen zur Kalibration von elektromagnetischen Feldsensoren*, (translation: *TEM cells for calibration of electromagnetic field probes*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, VDE Verlag, 2002
- [20] T.E. Harrington, Z. Chen, and M. D. Foegelle, "GTEM radiated emissions testing and FDTD modeling," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, pp. 770-775, 1999
- [21] T.E. Harrington, "Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, pp. 23-28, 2000
- [22] T.E. Harrington, and E.L. Bronaugh, "EUT directivity and other uncertainty considerations for GHz-range use of TEM waveguides," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, QC, Canada, pp. 117-122, 2001
- [23] CEI 61000-2-9, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2: Environnement – Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations rayonnées*
- [24] IEEE Std 1309-1996: *IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996
- [25] J.P. Kaerst, C. Groh, and H. Garbe, "Field mode properties of loaded waveguides," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 481-486, Feb. 2001
- [26] J.P. Kaerst, *Qualifikation beladener TEM Wellenleiter*, (translation: *Validation of loaded TEM waveguides*), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, VDE Verlag, 2002
- [27] M. Klingler, J. Rioult, J.-P. Ghys, and S. Fichoux, "Wideband total radiated power measurements of electronic equipment in TEM and GTEM cells," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 665-670, 1999
- [28] M. Koch, *Analytische Feldberechnung in TEM Zellen*, (translation: *Analytical Field Calculation in TEM Cells*), PhD-thesis, University of Hannover, *Shaker-Verlag*, Aachen, Germany, 1999, ISBN 3-8265-6017-5
- [29] G. Koepke, and M. Ma, "A new method to quantify the radiation characteristics of an unknown interference source," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 35-40, March 1983
- [30] M. Ma, and G. Koepke, *Uncertainties in Extracting Radiation Parameters for an Unknown Interference Source Based on Power and Phase Measurements*, *National Institute of Standards and Technology (NIST, formerly NBS)*, Technical Note 1064, June 1983
- [31] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson, "Uncertainties due to cross-polar coupling in GTEM cell emission measurement," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Rome, Italy, pp. 590-595, 1998

- [32] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson: "Indirect measurements of field uniformity in TEM cells including cross-polar field components," *International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, pp. 659-664, March, 1999
- [33] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1998
- [34] T. Schrader, *Vergleich von Feldgeneratoren für EMV-Prüfungen*, (translation: *Comparison of Field Generators for EMC Tests*), PhD-thesis, University of Braunschweig, Germany, 1997
- [35] I. Sreenivasiah, D. Chang, and M. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 23, no. 3, pp. 113-121, Aug. 1981
- [36] E. Steinke, P. Wilson, and H. Garbe, "An equivalent "radiated emission" voltage measurement standard for TEM cells," *International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Poland, pp. 301-304, Sept. 1992
- [37] M.J. Thelberg, E.L. Bronaugh, and J.D.M. Osburn, "GTEM to OATS radiated emissions correlation from 1-5 GHz," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, IL, pp. 387-392, 1994
- [38] J. Tippet, and D. Chang, "Radiation characteristics of electrically small devices in a TEM transmission cell," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 18, no. 4, pp. 134-140, Nov. 1976
- [39] L. Turnbull, and A. Marvin, "A treatment of the phase properties of GTEM to open-area test-site correlation techniques," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 1, pp. 62-69, Feb. 1998
- [40] P. Wilson, D. Hansen, and D. Koenigstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," *IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, pp. 171-177, May 1989
- [41] P. Wilson, "On correlating TEM cell and OATS emission measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 1, pp. 1-16, Feb. 1995
- [42] CEI 61000-4-3, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-3: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques*
- [43] CISPR/TR 16-4-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainties in standardized EMC tests*
Disponible en anglais seulement.
- [44] CISPR 16-4-2, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 4-2: Incertitudes, statistiques et modélisation des limites – Incertitudes de mesures CEM*
- [45] CISPR/TR 16-4-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-3: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistical considerations in the determination of EMC compliance of mass-produced products*
Disponible en anglais seulement.
- [46] CISPR/TR 16-4-4, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling – Statistics of complaints and a model for the calculation of limits for the protection of radio services*
Disponible en anglais seulement.

- [47] J. Glimm, K. Münter, R. Pape, T. Schrader, and M. Spitzer, "The New National Standard of EM Field Strength; Realisation and Dissemination", 12th Int. Symposium on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, Switzerland, ISBN 3-9521199-1-1, Page 611-613
 - [48] H. Garn, M. Buchmayr, and W. Mullner, "Precise calibration of electric field sensors for radiated susceptibility testing", *Frequenz* 53 (1999) 9-10, Page 190-194
 - [49] IEEE Standard 1309-2005, for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, 2005
 - [50] Guide ISO/CEI 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*
 - [51] S. Ishigami and M. Hirata, "A New Calibration Method for an E-field Probe using TEM Waveguides", The 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Zurich 2009), January 2009
 - [52] BIPM, CEI, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Organisation internationale de normalisation (ISO), Genève, Suisse, ISBN 92-67-10188-9, Première édition, 1993
 - [53] UKAS M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, Ed.2, 2007
 - [54] J. Glimm, K. Münter, R. Pape, T. Schrader, and M. Spitzer, "The New National Standard of EM Field Strength; Realisation and Dissemination", 12th Int. Symposium on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, Switzerland, ISBN 3-9521199-1-1, Page 611-613
 - [55] H. Garn, M. Buchmayr, and W. Mullner, "Precise calibration of electric field sensors for radiated susceptibility testing", *Frequenz* 53 (1999) 9-10, Page 190-194
 - [56] J.Labus, "Rechnerische Ermittlung der Impedanz von Antennen. (Mathematical calculation of the impedance of antennas) *Hochfrequenz und Elektroakustik*, vol. 41, pp. 17-23; January, 1933
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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