

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

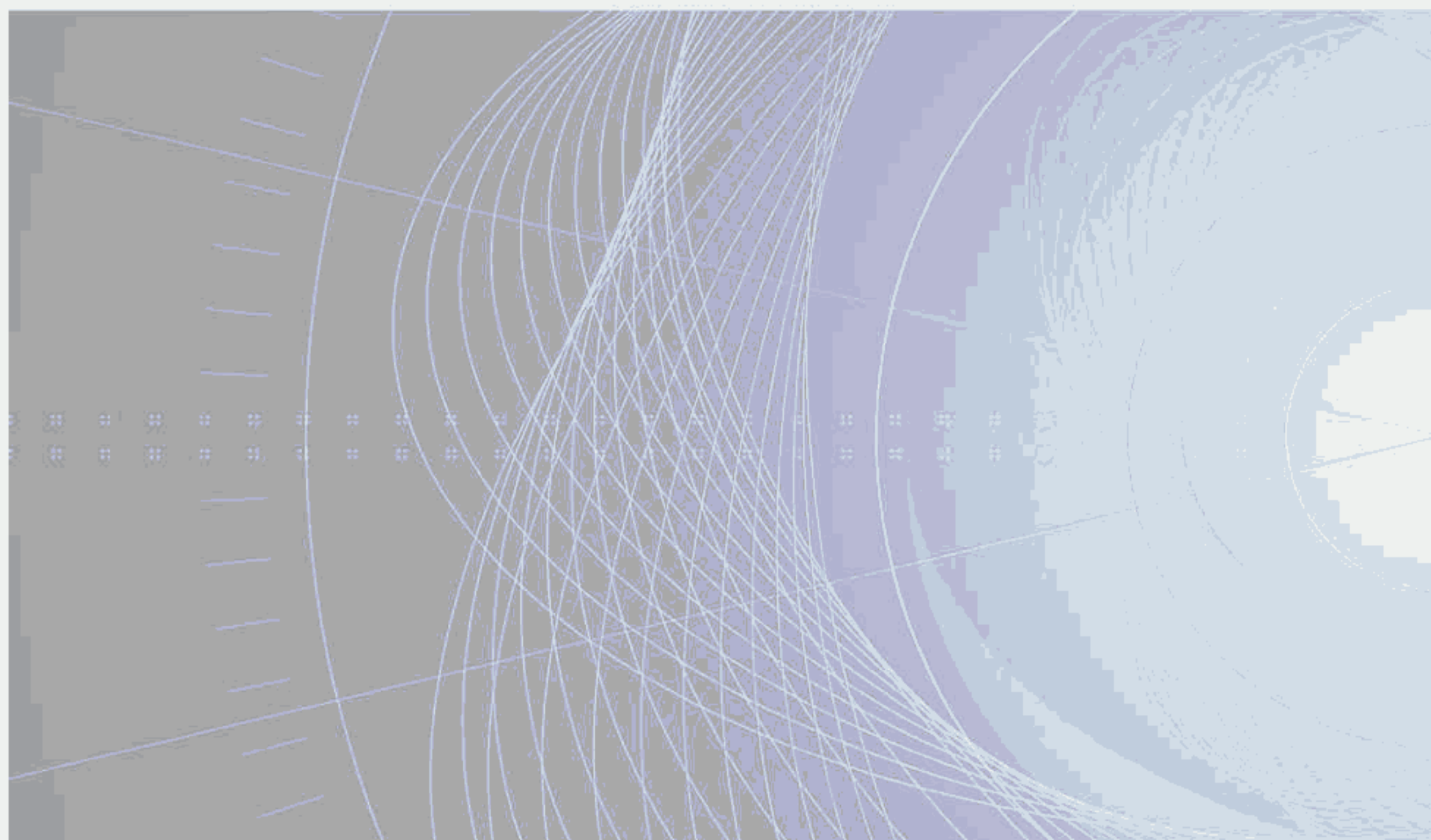


BASIC EMC PUBLICATION

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

**Electromagnetic compatibility (EMC) –  
Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test  
methods**

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –  
Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai en chambre  
réverbérante**







## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 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](mailto:inmail@iec.ch)  
Web: [www.iec.ch](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](mailto: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](http://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](http://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](http://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](http://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](mailto:csc@iec.ch)  
Tél.: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00





IEC 61000-4-21

Edition 2.0 2011-01

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



BASIC EMC PUBLICATION

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

**Electromagnetic compatibility (EMC) –  
Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test  
methods**

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –  
Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai en chambre  
réverbérante**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE  
CODE PRIX

**XE**

ICS 33.100.10; 33.100.20

ISBN 978-2-88912-324-7



# CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references .....	8
3 Terms, definitions and abbreviations .....	9
3.1 Terms and definitions .....	9
3.2 Abbreviations .....	12
4 General .....	13
5 Test environments and limitations .....	13
6 Applications.....	14
6.1 Radiated immunity.....	14
6.2 Radiated emissions .....	14
6.3 Shielding (screening) effectiveness .....	14
7 Test equipment.....	14
8 Chamber validation.....	15
9 Testing .....	16
10 Test results, test report and test conditions .....	16
Annex A (informative) Reverberation chamber overview .....	17
Annex B (normative) Chamber validation for mode-tuned operation .....	41
Annex C (normative) Chamber validation and testing for mode-stirred operation.....	50
Annex D (normative) Radiated immunity tests.....	56
Annex E (normative) Radiated emissions measurements .....	61
Annex F (informative) Shielding effectiveness measurements of cable assemblies, cables, connectors, waveguides and passive microwave components.....	68
Annex G (informative) Shielding effectiveness measurements of gaskets and materials.....	72
Annex H (informative) Shielding effectiveness measurements of enclosures.....	82
Annex I (informative) Antenna efficiency measurements .....	89
Annex J (informative) Direct evaluation of reverberation performance using field anisotropy and field inhomogeneity coefficients .....	91
Annex K (informative) Measurement uncertainty for chamber validation – Emission and immunity testing.....	100
Bibliography.....	107
Figure A.1 – Typical field uniformity for 200 independent tuner steps.....	32
Figure A.2 – Theoretical modal structure for a 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m chamber .....	32
Figure A.3 – Theoretical modal structure with small Q-bandwidth (high Q) superimposed on 60 <sup>th</sup> mode .....	33
Figure A.4 – Theoretical modal structure with greater Q-bandwidth (lower Q) superimposed on 60 <sup>th</sup> mode .....	33
Figure A.5 – Typical reverberation chamber facility.....	34
Figure A.6 – Theoretical sampling requirements for 95 % confidence.....	34
Figure A.7 – Normalized PDF of an electric field component at a fixed location for a measurement with a single sample .....	35



Figure A.8 – Normalised PDF of the mean of an electric field component at one fixed location for a measurement with $N$ independent samples .....	35
Figure A.9 – Normalised PDF of the maximum of an electric field component at a fixed location for a measurement with $N$ independent samples .....	36
Figure A.10 – Chamber working volume.....	37
Figure A.11 – Typical probe data .....	37
Figure A.12 – Mean-normalized data for $x$ -component of 8 probes .....	38
Figure A.13 – Standard deviation of data for $E$ -field components of 8 probes.....	38
Figure A.14 – Distribution of absorbers for loading effects test .....	39
Figure A.15 – Magnitude of loading from loading effects test .....	39
Figure A.16 – Standard deviation data of electric field components for eight probes in the loaded chamber .....	40
Figure B.1 – Probe locations for chamber validation .....	49
Figure C.1 – Received power (dBm) as a function of tuner rotation (s) at 500 MHz .....	55
Figure C.2 – Received power (dBm) as a function of tuner rotation (s) at 1 000 MHz .....	55
Figure D.1 – Example of suitable test facility.....	60
Figure E.1 – Example of suitable test facility.....	66
Figure E.2 – Relating to the calculation of the geometry factor for radiated emissions .....	67
Figure F.1 – Typical test set-up .....	71
Figure G.1 – Typical test set-up .....	80
Figure G.2 – Typical test fixture installation for gasket and/or material testing .....	80
Figure G.3 – Test fixture configured for validation.....	81
Figure H.1 – Typical test enclosure installation for floor mounted enclosure testing .....	88
Figure H.2 – Typical test enclosure installation for bench mounted enclosure testing.....	88
Figure J.1 – Theoretical and typical measured distributions for field anisotropy coefficients in a well-stirred chamber .....	97
Figure J.2 – Theoretical and typical measured distributions for field anisotropy coefficients in a poorly stirred chamber .....	98
Figure J.3 – Typical measured values for field anisotropy coefficients as a function of $N$ in a well-stirred chamber .....	99
Figure K.1 – Average emitted power as a function of frequency for a typical unintentional radiator .....	105
Figure K.2 – Estimated standard uncertainty .....	105
Figure K.3 – Mean normalized width (in dB) of a $\eta\%$ -confidence interval .....	106
Figure K.4 – Individual mean-normalized interval boundaries (in linear units) for maximum field strength as a function of the number of independent stirrer positions $N$ .....	106
Table B.1 – Sampling requirements .....	48
Table B.2 – Field uniformity tolerance requirements.....	48
Table J.1 – Typical values for total field anisotropy coefficients for 'medium' and 'good' reverberation quality .....	96



## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –****Part 4-21: Testing and measurement techniques –  
Reverberation chamber test methods**

## 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 61000-4-21 has been prepared by subcommittee 77B: High frequency phenomena, of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility, in co-operation with CISPR subcommittee A: Radio-interference measurements and statistical methods.

It forms Part 4-21 of IEC 61000. It has the status of a basic EMC publication in accordance with IEC Guide 107.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2003. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the first edition.

- In Clause 8, the use and specifications of *E*-field probes for application to reverberation chambers has been added. Additional Notes refer to general aspects and procedures of



probe calibrations. The specified range for linearity of the probe response is larger and covers an asymmetric interval compared to that for use in anechoic chambers (see Annex I of IEC 61000-4-3), because

- the fluctuations of power and fields in reverberation chambers exhibit a larger dynamic range, and
- the chamber validation procedure is based on using maximum field values, as opposed to the field itself or its average value,

respectively.

- In Annex A, additional guidance and clarifications on the use of reverberation chambers at relatively low frequencies of operation (i.e., close to the lowest usable frequency of a given chamber) are given, and its implications on the estimation of field uncertainty are outlined. Guidelines on cable-layout have been added. A rationale has been added that explains the relaxation of the field uniformity requirement below 400 MHz, being a compromise between scientific-technical and economical reasons when using chambers around 100 MHz. A first-order correction for the threshold value of the correlation coefficient at relatively low numbers of tuner positions has been added. Issues regarding the use of non-equidistant tuner positions at low frequencies are discussed in an additional Note.
- In Annex B, symmetric location of the field probes when the chamber exhibits cylindrical symmetry has been disallowed, as such placement could otherwise yield a false indication of field uniformity and chamber performance at different locations. The difference between start frequency for chamber validation and lowest test frequency has been clarified. The tuner sequencing for chamber validation and testing is now specified to be equal in both cases. In sample requirements for chamber validation, emphasis is now on the required minimum number of independent tuner steps to be used, whereas the minimum recommended number of samples per frequency interval has been replaced with the number of independent samples that the tuner can provide per frequency, for use in case when the chamber validation fails for the required minimum number.
- Annex C now contains more quantitative guidance on the setting of the maximum permissible stirring speeds that warrant quasi-static conditions of operation for chamber validation and testing. Consideration is given to all characteristic time scales of all components or subsystems of a measurement or test. Specific issues relating to chamber validation, immunity testing and bandwidth are addressed. Particular requirements for field probes when used with mode stirred operation are listed.
- In Annex D, a requirement for the EUT and equipment not to occupy more than 8 % of the total chamber volume in immunity testing has been added. The maximum number of frequency points and the formula to calculate these points have been generalized. A mandatory specification for including the measurement equipment, test plan and cable layout in the test report has been added to resolve any dispute in case of discrepancies, particularly for low-frequency immunity testing.
- Annex E has been extended with further guidance on the value of EUT directivity to be used in the estimation of radiated power and field. Extended estimates have been added for the maximum directivity of electrically large, anisotropically radiating EUTs and for radiated emissions in the presence of a ground plane. A mandatory specification for including the measurement equipment, test plan and cable layout in the test report has been added to resolve any dispute in case of discrepancies, particularly for low-frequency emissions testing.
- In Annex I, some clarifications on antenna efficiency measurements have been added.
- A new Annex K has been added that covers measurement uncertainty in reverberation chambers. The intrinsic field uncertainty for chamber validation, immunity and emissions measurements is quantified. Other contributors to measurement uncertainty are listed.



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

CDV	Report on voting
77B/619/CDV	77B/640/RVC

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.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability 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.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**



## 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 or as technical specifications or technical reports, some of which have already been published as sections. Others will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision (example: IEC 61000-6-1).



## ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

### Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods

#### 1 Scope

This part of IEC 61000 considers tests of immunity and intentional or unintentional emissions for electric and/or electronic equipment and tests of screening effectiveness in reverberation chambers. It establishes the required test procedures for performing such tests. Only radiated phenomena are considered.

The objective of this part is to establish a common reference for using reverberation chambers to evaluate the performance of electric and electronic equipment when subjected to radio-frequency electromagnetic fields and for determining the levels of radio-frequency radiation emitted from electric and electronic equipment.

NOTE Test methods are defined in this part for measuring the effect of electromagnetic radiation on equipment and the electromagnetic emissions from equipment concerned. The simulation and measurement of electromagnetic radiation is not adequate for quantitative determination of effects. The defined test methods are organized with the aim to establish adequate reproducibility and repeatability of test results and qualitative analysis of effects.

This part of IEC 61000 does not intend to specify the tests to be applied to a particular apparatus or system. Its main aim is to give a general basic reference to all concerned product committees of the IEC. The product committees should select emission limits and test methods in consultation with CISPR. The product committees remain responsible for the appropriate choice of the immunity tests and the immunity test limits to be applied to their equipment. Other methods, such as those covered in IEC 61000-4-3, CISPR 16-2-3 and CISPR 16-2-4 may be used.<sup>1</sup>

#### 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):1990, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

Amendment 1 (1997)

Amendment 2 (1998)

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

IEC 61000-4-3:2006, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*

Amendment 1 (2007)

<sup>1</sup> For further information consult with CISPR (International Special Committee on Radio Interference) or Technical Committee 77 (Electromagnetic compatibility).



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

### 3 Terms, definitions and abbreviations

#### 3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions together with those in IEC 60050(161) apply.

##### 3.1.1

##### **antenna**

that part of a radio transmitting or receiving system which is designed to provide the required coupling between a transmitter or a receiver and the medium in which the radio wave propagates

[IEC 60050-712:1992, 712-01-01]

NOTE For the purpose of this procedure, antennas are assumed to have an efficiency of 75 % or greater.

##### 3.1.2

##### **electromagnetic wave**

##### **EM wave**

wave characterized by the propagation of a time-varying electromagnetic field and caused by acceleration of electric charges

[IEC 60050-705:1995, 705-01-09, modified]

##### 3.1.3

##### **far field region**

that region of the electromagnetic field of an antenna or unintentional radiator wherein the predominant components of the field are those which represent a propagation of energy and wherein the angular field distribution is essentially independent of the distance from the antenna

NOTE 1 In the far field region, all the components of the electromagnetic field decrease in inverse proportion to the distance from the antenna.

NOTE 2 For a broadside antenna having a maximum overall dimension,  $D$ , which is large compared to the wavelength,  $\lambda$ , the far field region is commonly taken to exist at distances greater than  $2D^2/\lambda$  from the antenna in the direction of maximum radiation.

[IEC 60050-712:1992, 712-02-02]

the region far from a source or aperture where the radiation pattern does not vary with distance from the source

[IEC 60050-731:1991, 731-03-92]

##### 3.1.4

##### **field strength**

magnitude of the electromagnetic field created at a given point by a radio transmitting system operating at a specified characteristic frequency with specified installation and modulation conditions

[IEC 60050-705:1995, 705-08-31]



NOTE 1 The term "electric field strength" (in V/m) or "magnetic field strength" (in A/m) is used according to whether the magnitude of the electric or magnetic field, respectively, is measured. In the near-field region, the relationship between the electric and magnetic field strength and distance depends on the specific configuration involved. The power flux density of the field is similarly indeterminate.

NOTE 2 In the far zone, field strength is sometimes identified with power flux density  $P$ . For a plane wave in free space,  $P = E^2 / \eta_V$ , where

$E$  is the electric field strength, and

$\eta_V$  is the intrinsic impedance of free space, approximately equal to  $120\pi \Omega$ .

### 3.1.5 polarization

property of a sinusoidal electromagnetic wave or field vector defined at a fixed point in space by the direction of the electric field strength vector or of any specified field vector; when this direction varies with time, the property may be characterized by the locus described by the extremity of the considered field vector

[IEC 60050-726:1982, 726-04-01]

### 3.1.6 reverberation chamber

room specially designed to have a very long reverberation time

[IEC 60050-723:1997, 723-03-30]

(reverberation room) room having a long reverberation time, especially designed to make the field therein as diffuse as possible

NOTE 1 The room consists of a shielded enclosure that is generally equipped with mechanical tuners/stirrers that change (stir) the boundary conditions within the enclosure and, thus, alter the structure of the electromagnetic fields within the enclosure.

[IEC 60050-801:1994, 801-31-13, modified]

NOTE 2 Reverberation rooms are used in particular for the measurement of absorption coefficients of materials and measurement of the power emitted by intentional or unintentional radiating sources.

NOTE 3 Testing in a reverberation chamber can be described as a stochastic process in which the mechanical tuners/stirrers "stir" the "modes" inside the enclosure. Therefore, such chambers are also called stirred-mode, mode-stirred or mode-tuned chamber.

### 3.1.7 quality factor (of a reverberation chamber)

$Q$

(quality factor) frequency-dependent measure of sharpness of the resonance, equal to  $2\pi$  times the ratio of the maximum stored energy to the energy dissipated during one period

[IEC 60050-151:2001, 151-15-46, modified]

measure of how well the chamber stores energy (see Clause A.6 [2]<sup>2</sup>)

NOTE For a given chamber,  $Q$  varies as a function of frequency and can be calculated using the following formula:

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{Input}} \right\rangle_n \quad (4)$$

where

$V$  is the chamber volume (in m<sup>3</sup>),

<sup>2</sup> Numbers in square brackets refer to the reference documents in the respective annexes.



$\lambda$  is the wavelength (in m),

$P_{\text{AveRec}}/P_{\text{Input}}$  is the ratio of the received power to the input power, each averaged over one complete tuner/stirrer sequence,

$\langle \rangle_n$  denotes averaging with respect to the number of antenna locations and orientations,  $n$ ,

$\eta_{\text{Tx}}$  and  $\eta_{\text{Rx}}$  are the antenna efficiency factors (dimensionless) for the Transmit (Tx) and Receive (Rx) antennas, respectively. If manufacturer's data is not available then the efficiency can be assumed to be 0,75 for log periodic antennas and 0,9 for horn antennas,

$n$  is the number of antenna locations and orientations that the  $Q$  is evaluated for. Only one location is required as a minimum; however, multiple locations and orientations may be evaluated and the data averaged over them.

### 3.1.8

#### **Q-bandwidth** (of a reverberation chamber)

##### **$BW_Q$**

measure of the frequency range over which the modes in a reverberation chamber are correlated (see Clause A.2)

NOTE The  $BW_Q$  of a reverberation chamber can be calculated using the following formula:

$$BW_Q = f/Q \quad (5)$$

where

$f$  is the frequency (in Hz),

$Q$  is the quality factor defined in 3.1.7.

### 3.1.9

#### **malfunction**

loss of capability of the equipment to initiate or sustain a required function, or the initiation of undesired spurious action which might result in adverse consequences

NOTE The criteria of functional acceptance have to be precisely specified.

[IEC 60050-393:2003, 393-17-79]

### 3.1.10

#### **emission**

phenomenon by which energy emanates from a source in the form of waves or particles

[IEC 60050-702:2003, 702-02-03]

### 3.1.11

#### **tuner/stirrer**

mechanical device constructed from low-loss electrically conductive material which alters the electromagnetic boundary conditions inside a reverberation chamber

NOTE In general, a reverberation chamber is a shielded enclosure with the smallest dimension being large with respect to the wavelength at the lowest usable frequency. The chamber is normally equipped with a mechanical tuning/stirring device whose dimensions are significant fractions of the chamber dimensions and of the wavelength at the lowest usable frequency. When the chamber is excited with RF energy, the boundary conditions of the resulting multi-mode electromagnetic environment can be altered by the mechanical tuner/stirrer. The resulting environment is statistically uniform and statistically isotropic (i.e., the energy arriving from all aspect angles with all directions of polarizations) when considered over a sufficiently large number of positions of the mechanical tuner/stirrer.

### 3.1.12

#### **electromagnetic mode**

one solution of Maxwell's equations representing an electromagnetic field in a certain space domain and belonging to a family of independent solutions defined by specified boundary conditions



[IEC 60050-705:1995, 705-01-12]

### **3.1.13 validation**

process of confirming that a finalized instrumentation, control system (hardware and software) and test facility complies with all of its functional, performance and interface requirements

[IEC 60050-394:2007, 394-40-42, modified]

### **3.1.14 chamber validation**

process of confirming that a chamber complies with all of its functional, performance and interface requirements

[IEC 60050-394:2007, 394-40-42, modified]

### **3.1.15 intrinsic field uncertainty IFU**

contribution to the overall uncertainty budget that is caused by the random (statistical) nature of the field inside a reverberation chamber

NOTE Typically, the intrinsic field uncertainty is considerably larger than the measurement instrumentation uncertainty in typical operation of a reverberation chamber, except when the chamber has an exceptionally high quality factor. As a result, the IFU is typically the only or main contribution to be considered in estimating the overall uncertainty during test or measurement.

### **3.1.16 working volume**

region defined by 8 points inside the chamber at sufficient distance away from the walls to avoid boundary effects, for rectangular chambers typically defined by the corners of a cubic or parallelepiped region at quarter-wavelength distance from the nearest walls

NOTE For frequencies below 100 MHz, the distances can be restricted to 0,75 m.

## **3.2 Abbreviations**

AVF	Antenna Validation Factor
CVF	Chamber Validation Factor
CDF	Cumulative Distribution Function
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques <sup>3</sup>
CLF	Chamber Loading Factor
CW	Continuous Wave
EM	Electromagnetic
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
EUT	Equipment Under Test
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Image Frequency
IFU	Intrinsic Field Uncertainty
IL	Insertion Loss
ISO	International Organization for Standardization

<sup>3</sup> International Special Committee on Radio Interference



LUF	Lowest Usable Frequency
MIU	Measurement Instrumentation Uncertainty
MU	Measurement Uncertainty
OATS	Open Area Test Site
PDF	Probability Density Function
RC	Reverberation Chamber
RE	Radiated Emissions
RF	Radio Frequency
RMS	Root Mean Square
rps	revolutions per second
RSS	Root Sum of the Squares
Rx	Receive (antenna)
SE	Shielding Effectiveness
SW	Square Wave modulation
TFVF	Test Fixture Validation Factor
Tx	Transmit (antenna)

## 4 General

Most electronic equipment is, in some manner, affected by electromagnetic radiation. Sources of radiation can be natural or man-made in origin and can be intentional or unintentional. Examples of intentional radiators are wireless and personal communication systems. Examples of unintentional radiators are welders, thyristors, high-speed data buses, fluorescent lights, switches operating inductive loads, etc.

Realistic environments for propagation of electromagnetic waves are often characterized by multiple reflections and multipath effects. Reverberation chambers go some way to simulate such complex environments in an extreme manner (worst-case effect) and may be more representative than other EMC test methods in this respect. An advantage of reverberation chambers is the ability to generate a statistically isotropic, homogeneous, unpolarized and uncorrelated interior field, through action of the tuner/stirrer.

High-level electromagnetic fields are easily and safely generated using reverberation chambers. The high quality factor or “*Q*” of such chambers allows fairly high field strengths to be generated with relatively moderate input powers (resonant fields). The absence of absorber makes generation of high field levels safer as the risk of igniting absorbers is eliminated. Adequate screening of the enclosure confines the high fields to the interior of the chamber.

## 5 Test environments and limitations

The reverberation chamber method is suitable for performing tests from relatively low to extremely high field levels. Due to the high level of isolation from the ambient environment, both emissions and immunity tests can be performed for most commercial requirements without limitations. At present, the IEC sets the transition frequency between radiated and conducted testing at 80 MHz for immunity testing.

NOTE IEC 61000-4-6 also defines test methods for establishing the immunity of electrical and electronic equipment against conducted electromagnetic energy. It covers frequencies below 80 MHz.

As stated in Annex A, the frequency range of tests is determined by the size and construction of the chamber and the effectiveness of the mechanical tuner(s) in altering the spatial field pattern. There are no fundamental restrictions with regard to the shape and size of enclosures



eligible for use as reverberation chambers. However, good reverberant properties at a specified frequency of operation require a minimum chamber size. Room-sized reverberation chambers (e.g., volumes between 75 m<sup>3</sup> to 100 m<sup>3</sup>) are typically operated from 200 MHz to 18 GHz without limitations. Operation below 200 MHz requires chambers that are larger than the typical shielded room.

## 6 Applications

### 6.1 Radiated immunity

The use of reverberation chambers for performing radiated immunity testing is covered in Annex D. This annex covers test set-up, chamber validation, and test procedures. Injecting a predetermined level of RF power into the chamber generates the desired field strength within the chamber. This predetermined level of RF power is derived from chamber validation data described in Annexes B and C.

### 6.2 Radiated emissions

The use of reverberation chambers to measure radiated emissions is covered in Annex E. The described method measures the amount of RF power radiated by the EUT within the measurement bandwidth. As with radiated immunity testing, chamber validation data described in Annexes B and C are used to determine radiated emissions levels.

### 6.3 Shielding (screening) effectiveness

Three annexes are devoted to performing screening effectiveness measurements. Screening effectiveness measurements of cable assemblies, cables, connectors, waveguides and passive microwave components are described in Annex F. Annex G covers screening effectiveness of gaskets and materials. The approach outlined in Annex G uses a nested chamber methodology (e.g., a reverberation chamber located inside a larger reverberation chamber). Annex G also covers validation of test fixtures that are usually necessary for conducting screening effectiveness measurements on gaskets and materials. Minor differences in test fixture design/ construction can have significant influence on test results. Fixture materials, bolt spacing, surface finishes, torque settings, etc. shall all be controlled in order to get repeatable results. Due to the large number of variations that would be needed in order to accommodate the many different gaskets and materials that require evaluation, this annex does not contain detailed design guidance for test fixtures. Annex H covers screening effectiveness measurements of enclosures. As in Annex G, the methodology described in Annex H uses the “nested chamber” approach.

## 7 Test equipment

The following types of test equipment are recommended:

- Reverberation chamber: having a size that is adequate to maintain a multi-mode electromagnetic environment with respect to the lowest test frequency. This implies that the chamber dimensions in all directions shall be large compared to the wavelength;
- Mechanical tuner(s)/stirrer(s) (see Annex A): having one dimension that is at least one-quarter wavelength at the lowest frequency. Each tuner/stirrer should also be as large as possible with respect to the overall chamber size in that one dimension and should be at least three-quarters of the smallest chamber dimension. In addition, each tuner/stirrer should be shaped asymmetrically, i.e., such that a non-repetitive field pattern is obtained over one revolution of the tuner/stirrer;
- Field generating antennas (see Annex B): log periodic or other well-matched antenna capable of satisfying frequency and power requirements and avoiding direct illumination of the test volume;
- Field strength reference antennas (see Annex B): log periodic or other linearly polarized well-matched antenna system capable of satisfying frequency requirements;



- Isotropic field strength monitoring probe (see Annex B): capable of monitoring the electric field along all three orthogonal axes. Any probe-head circuitry and opto-electronics shall have adequate immunity to the field strength to be measured and a fibre-optic link to the indicator outside the chamber. An adequately filtered line may also be used;

NOTE 1 Reverberation chambers 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 then it should be repositioned to measure each field component separately in different directions.

- Field strength monitoring antenna that is a small (calibrated) dipole antenna (i.e., less than  $0,1 \lambda$ ) may be substituted for the probe, provided that the antenna is positioned at three non-coplanar orientations (mutually perpendicular preferred) for each measurement location. Care should be taken to maintain the balance of this antenna with respect to its feed cable;
- EMI filters: care should be taken to ensure that the filters introduce no additional resonance effects on the connected lines;
- RF signal generator(s) capable of covering the frequency band of interest and which, if used for immunity testing, can be amplitude modulated by a 1 kHz sine-wave to 80 % depth. They shall have either an automated sweep capability or, in the case of RF synthesizers, be capable of being programmed with frequency-dependent stepsizes and dwell times. They shall also be capable of being set manually;

NOTE 2 Product committees may select alternative modulation schemes.

The use of low-pass or band-pass filters may be necessary to avoid problems caused by harmonics to equipment which is intended to receive signals for monitoring purposes;

- Power amplifiers: for amplifying a signal (unmodulated and modulated) and provide antenna power to the necessary field level. The harmonics and distortion produced by the power amplifier shall be at a level less than or equal to 15 dB below carrier level;

**WARNING** – High reflections are present in reverberation chamber tests, amplifier protection may be required against impedance mismatch.

- Associated equipment to record the power levels necessary for the determination of emission limits or field strength, and to control the generation of that level for testing. A directional coupler can be used to monitor the forward power.

NOTE 3 Any specification of the type of receiver to be used (e.g., EMI receiver specified in CISPR) should be determined by the relevant product committee.

Care shall be taken to ensure adequate immunity of the auxiliary equipment.

## 8 Chamber validation

Following the initial construction of the chamber or after any major modification, a performance-based field uniformity validation technique to demonstrate adequate reverberation chamber performance is carried out in accordance with Annex B. The procedure can be used to determine the lowest useable frequency (LUF) of the chamber employed. The chamber field uniformity validation procedure is carried out over a test/working volume, which includes the location of the test bench and equipment under test (EUT) inside the reverberation chamber. The chamber validation addresses only mode-tuned (i.e., stepped tuner rotation) operation of the chamber, whereas mode-stirred (continuous tuner rotation) operation is addressed separately in Annex C. The field uniformity measurement should be carried out with all support equipment (including the test bench) removed from the chamber. The validation is to be carried out at 8 sufficiently widely separated locations for 3 mutually orthogonal axes (x, y, z) at each test location, i.e., 24 measurement values in total per frequency (B.1.2). The field within the chamber is considered uniform if the standard deviation is within 3 dB above 400 MHz, 4 dB at 100 MHz decreasing linearly to 3 dB at 400 MHz, and within 4 dB below 100 MHz.

The validation technique requires the use of linear/passive field monitoring antennas during EUT testing. The antennas are calibrated against a three-axis *E*-field sensor (calibrated in an anechoic environment, e.g., in accordance with Annex I of IEC 61000-4-3, valid for chamber



validation). The purpose of this aspect of the procedure is to allow continuous monitoring of the field during the test with an antenna and associated monitoring equipment with a fast response time.

NOTE 1 The dynamic range across which a field probe should exhibit a linear response is significantly larger in a reverberation chamber than in other test facilities. This is due to the resonant nature of its interior field, which causes large variations of the field strength at any point inside the working volume as a function of rotation angle of the tuner/stirrer, typically by 30 dB or more.

NOTE 2 The linearity of the probe which is used for the chamber validation shall be within  $\pm 0,5$  dB from an ideal linear response in a range of (–6 dB, +10 dB) relative to the average field strength. The asymmetry of this interval is due to the corresponding asymmetry of the probability density function of the field strength inside a reverberation chamber, which favours higher field strengths. For field monitoring during immunity testing, this range applies with respect to the average value of the maximum field strength.

WARNING A particular issue in the use of field probes is the susceptibility of the attached control electronics of the probe (meter unit) to local field strength inside the reverberation chamber. High values of the local field strength may cause malfunction or inaccurately measured values by the probe. This requires the calibration of the probe to be performed by exposing the entire meter unit of the probe (not just its sensor elements) to the expected maximum field strength in the chamber during chamber validation and/or testing.

In addition, a check on the impact of chamber loading on field uniformity is performed (B.1.6) to determine the maximum acceptable loading of the chamber for future testing.

Prior to the start of each test with the test bench and EUT installed in the chamber, the following procedure is carried out.

- A “quick check” chamber performance measurement is made with the equipment to be tested and test bench installed in the chamber (Clause B.2). The purpose of this test is to confirm that the loading of the chamber is less than that during the initial chamber validation.
- Calculations based on the validation measurements are used to determine the minimum pulse width (Clause B.3) that can be sustained in a given chamber for pulse modulation testing.

NOTE 3 The chamber validation detailed in Clause B.1 need only be undertaken after initial chamber construction, and after major modification to the reverberation chamber. The maximum chamber loading verification (subclauses A.5.4, B.1.5) need only be undertaken after initial chamber construction or after major modifications to the reverberation chamber. Changes to the tuners/stirrers are considered major modifications if the changes result in a reduction of the tuner efficiency as outlined in Clause A.3.

## 9 Testing

The test set-up and procedures are dependent upon the type of test being performed. Refer to the annex that pertains to the type of test being performed to determine the test requirements for a specific test.

Refer to the annex that pertains to the type of test methodology desired (i.e., mode-tuned or mode-stirred). For guidance on applicability of mode-tuning versus mode-stirring, refer to Annexes A and C.

## 10 Test results, test report and test conditions

Tests 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. Refer to the annex that pertains to the type of test being performed to determine what needs to be included in the test report.

Unless otherwise stated in the test plan, tests shall be carried out in standard climatic conditions in accordance with IEC 60068-1.

NOTE The generation of high field strengths may give rise to significant local heating effects or arcing in extreme cases.



## Annex A (informative)

### Reverberation chamber overview

#### A.1 Preliminary remarks

##### A.1.1 General

Research on electromagnetic reverberation chambers has been performed for more than 50 years [1 to 5]<sup>4</sup> (see [6 to 8] for reviews) and has provided a better understanding of the methods of operation and analysis [8 to 11]. While the initial focus of this research was on measuring electromagnetic absorption of materials [1 to 3], the scope has expanded to include radiated emissions [4, 30], susceptibility testing of electronic equipment [5, 30], immunity testing, and the shielding effectiveness of cables, connectors and enclosures [31]. Reverberation chambers can also be used for characterisation of certain antenna and propagation parameters.

##### A.1.2 Chamber size, shape, construction and operation

A reverberation chamber is an electrically large, highly conductive cavity or chamber, furnished with a mechanism for altering (stirring) its modes, to perform electromagnetic (EM) measurements (both emissions and immunity) on electronic equipment. Any facility that fits this description can be considered a reverberation chamber (also called a mode-stirred chamber or mode-tuned/mode-stirred reverberation chamber or stirred-mode cavity). However, other conditions may need to be fulfilled before such a facility can be used with acceptable low uncertainty.

In general, a reverberation chamber is a shielding enclosure whose smallest dimension is large with respect to the wavelength at the lowest useable frequency (LUF, see A.1.3). It shall also be sufficiently large to accommodate the equipment under test, the stirrers and the measurement antennas. The chamber is normally equipped with a mechanical tuning/stirring device, whose dimensions are significant fractions of the chamber dimensions and of the wavelength at the LUF (see A.1.4). When the chamber is excited with RF energy, the resulting multi-mode electromagnetic environment can be “stirred” by the mechanical tuner/stirrer. The resulting field is statistically uniform, statistically isotropic (i.e., the energy having arrived from all aspect angles) and statistically randomly polarised (i.e., with all possible directions of polarisation) when averaged over a sufficient number of positions of the tuner/stirrer. By “sufficient number” is meant the number of tuner steps that is required to yield the specified field uniformity.

It is not practical to define a minimum size test chamber and it is outside the scope of this standard to provide detailed design guidance. The critical factor is that if a chamber fulfils the validation procedure (see B.1.2) then this demonstrates that it provides the required electromagnetic environment at the desired level of statistical confidence.

All power measurements are normally taken relative to the antenna terminals. Hence the chamber input power ( $P_{\text{Input}}$ ) is taken to be the forward power delivered at the antenna terminals. In some cases it is necessary to take into account the reflected power caused by antenna/excitation-induced mismatch. In such cases the input power shall be the net input power, which is equal to (in linear units, e.g. W):

$$P_{\text{Net}} = P_{\text{Forward}} - P_{\text{Reflected}} \quad (\text{A.1})$$

<sup>4</sup> Figures in brackets refer to Clause A.6, Reference documents, at the end of this annex.



### **A.1.3 Lowest usable frequency (LUF)**

The chamber size, shape, quality factor, and the effectiveness of the mechanical tuner/stirrer determine the LUF. The LUF is generally defined as the frequency at which the chamber meets operational requirements. In practice, for the criteria set out in this standard, this typically occurs at a frequency slightly above three times the first chamber resonance. For the procedure described in this standard, the LUF is the lowest frequency at which the specified field uniformity can be achieved over a volume enclosed by eight corner locations.

### **A.1.4 Chamber quality (Q-) factor**

The quality factor is a measure for the ability of a chamber or cavity to store energy relative to its rate of dissipation. The ability of a chamber to store energy is determined by the frequency, volume (and, to a lesser extent, shape), and electromagnetic losses present in the chamber. The dominant loss mechanism in an empty chamber (i.e., without EUT in place) is due to the chamber walls and the antennas. Other losses may occur as a result of leakage through unintentional apertures or intentional loading. The higher the conductivity of the materials used to construct the chamber walls and the smaller the apertures, the lower the chamber losses. Materials such as silver, copper and aluminium sheet offer the highest conductivity and therefore the lowest ohmic losses. Other materials such as bare or painted steel or galvanised sheet are also common. For miniature microwave cavities, superconducting materials at low temperatures may be considered if exceptionally high  $Q$  values are desired.

Copper and aluminium screen and flame spray, however, have large surface areas and do not result in high  $Q$  environments. Additional losses such as antennas, support structures, and the equipment under test (EUT) can also affect the overall  $Q$  of the chamber.

The contribution by ohmic losses in an antenna is often sufficiently small to be negligible, as in this clause (see also Annex I). The power needed to generate a specific field inside a chamber can be determined from the empty chamber validation procedure outlined in Annex B. However, the EUT, the required support equipment, or any absorbing material present may load the chamber, reduce the chamber  $Q$ , and hence reduce the test fields for the same input power. Therefore, the fields in a loaded chamber shall be monitored and input power shall be increased where necessary, in order to compensate for this loading as described in Clause B.2 (7).

### **A.1.5 Tuner/stirrer considerations**

Techniques exist, other than using mechanical tuners/stirrers that can also achieve a statistically uniform and statistically isotropic environment. Examples include flexible walls or moving boundaries, moving transmitting or receiving antennas or EUT, and changing the frequency over some bandwidth (single-tone frequency variation (scanning) or band-limited noise excitation), or a combination of these. While these techniques may produce a valid test, this standard assumes that the chamber is configured with at least one rotating tuner/stirrer. Some of these alternative methods of stirring may not be applicable to certain EMC tests, e.g. frequency stirring cannot be used in emissions testing. The combined use of different stirring techniques (so-called hybrid stirring) may assist in achieving lower uncertainties in a given chamber, or allowing for smaller chambers for a given uncertainty level.

The tuners/stirrers should be adequate to provide the desired field uniformity. Symmetries in the design and placement of the stirrer should be avoided, to maximize the maximum number of independent positions that it can generate. A method of evaluating tuner/stirrer performance is given in Clause A.3.

In some chambers, it may be necessary to use multiple tuners/stirrers to obtain the desired field uniformity at the required frequencies.

Stepping motors or encoder-equipped servo-motors with computer control are recommended. Variable-speed continuous motors with belt-drive mechanism are acceptable, but the time



response of the EUT shall be fast relative to tuner/stirrer speed for this option to be viable and positioning of the position of the paddle wheel may be less accurate or repeatable. A check on possible EMI by the motor should be conducted during commissioning of the chamber.

In the past, testing was performed using a fixed number of samples or tuner steps (typically 200) at all frequencies of interest [5]. This resulted in uncertainties (i.e., statistical inhomogeneity and anisotropy) of the field that varied as a function of frequency due to the increase in modal density (see A.2.1) at the higher frequencies. As shown in Figure A.1, the uncertainty for a typical chamber varied considerably as a function of frequency in this case.

In this standard, the procedure optimises the number of steps or samples to obtain a given level of uncertainty (i.e., standard deviation of the field uniformity, here specified in terms of the measured maximum field) as a function of frequency. This allows for the number of samples to be decreased with increasing frequency. The procedure provides an accurate and economical method for validating reverberation chambers. It allows for an operator to adjust the number of tuner steps generated to obtain the desired level uncertainty as well as to maximize the ability of the chamber to generate higher fields by increasing the number of tuner steps as far as possible.

#### A.1.6 General remarks on chamber validation

The validation procedure places a stringent requirement on the time- (i.e., ensemble-) averaged fields [9, 10, 16] generated within the test volume to be uniform, to within a specified uncertainty. To ensure this, three measurements are required at each one of eight locations for three mutually perpendicular orientations. Each measurement is independent, which results in a total of 24 measurements per frequency. A chamber that passes the validation procedure will have demonstrated its ability to generate the required field uniformity within the accepted uncertainty level.

#### A.1.7 Cable lay-out

As a general rule, for cables connected to an EUT, test results are insensitive to cable layout, because of the statistical field homogeneity. Specific guidance on cable layout, where necessary, is provided in the relevant annexes.

### A.2 Cavity theory

#### A.2.1 Cavity modes, mode density and Q-bandwidth

A cavity mode (also known as eigenmode or natural mode), as defined in 3.1.12, is a particular field distribution generated by standing waves. The modes in a cavity are governed by the boundary conditions (shape and size of the cavity and mode stirrer). For an ideal, lossless, empty, closed rectangular cavity of dimensions  $L$  (length),  $W$  (width), and  $H$  (height), the modal or resonance frequencies  $F_{l,m,n}$ , in MHz, can be shown to be

$$F_{l,m,n} = 150 ((l/L)^2 + (m/W)^2 + (n/H)^2)^{0,5} \quad (\text{A.2})$$

where

$l$ ,  $m$ , and  $n$  are the mode indices (at least two of which are nonzero), and

$L$ ,  $W$ , and  $H$  are the chamber dimensions (in m).

Figure A.2 shows the theoretical mode distribution as a function of frequency for a 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m ( $L \times W \times H$ ) rectangular chamber. Each mode represents a unique spatial field variation (modal structure) as a function of location throughout the cavity. The lowest resonance frequency of this chamber ( $F_{1,1,0}$ ) occurs at 32,096 MHz. Any losses tend to marginally decrease the resonance frequencies. Each mode has its own modal  $Q$ -factor  $Q_{l,m,n}$ . The modal  $Q$  values increase approximately with the square root of frequency. An



“effective”  $Q$  of an overmoded cavity can be defined as a weighted average over the excited modes [28]. The quality factor bandwidth,  $BW_Q$ , of the cavity is defined as  $F_{l,m,n}/Q$  at the 3 dB points of a second order resonance characteristic. A representative  $BW_Q$  is shown at  $F_{4,2,2}$  (the 60<sup>th</sup> mode) in Figure A.3. In this case, only a few modes are excited when the cavity is driven by a CW source at  $F_{4,2,2}$ .

Figure A.4 shows the effect of decreasing the  $Q$  of the cavity (see A.1.3 and A.5.7). In this case, additional modes can be excited when the cavity is driven at the frequency of the 60<sup>th</sup> mode because of modal overlap due to lower  $Q$  and smaller frequency spacing. The effective modal structure is the vector sum of the excited modes weighted with different amplitudes. The spatial field variation will now be different from that obtained with the higher  $Q$  cavity. Thus, varying the cavity  $Q$  can change the “effective” modal structure. Note that if the frequency were increased, more modes would be available within a given  $BW_Q$ , giving rise to a finer structure of the field. Again, the effective modal structure would be the vector sum of the modes.

Figures A.3 and A.4 show that, at the lower frequencies, the modal population of a chamber is sparse and it is with frequency gaps of different size (spectrally non-uniform). The figures also show that as frequency is increased the number and density of the modes increases on average (proportionally to  $f^3$  and  $f^2$ , respectively). The effective modal structure combined with the ability of the tuner to change the boundary conditions of the chamber determines how well a reverberation chamber will perform.

NOTE A chamber may have an arbitrary geometry. However, some shapes such as spherical and circular cylindrical ones are normally not used for reverberation chambers, because the curved surfaces can produce caustics (focusing of rays) that make it difficult to obtain spatial field uniformity, unless they are furnished with diffractors of sufficiently large size relative to the wavelength [12, 13] or if the focal region is avoided.

The effective modal structure depends on both the mode density and the quality factor bandwidth at the frequency of interest. The mode density at frequency  $f$  is  $m = 8\pi Vf^2/c^3$ . To first order in frequency, the value of  $m$  is independent of the shape of the cavity [11]. However, second-order corrections that depend on the curvature of surfaces and on the length of edges and joints [12] may become significant at lower frequencies. The number of modes,  $M$ , excited within the  $BW_Q$  at  $f$  can be estimated as

$$M = m \times BW_Q = \frac{8\pi V f^3}{c^3 Q} \quad (\text{A.3})$$

where

$f$  is the frequency (in Hz),

$c$  is the speed of light in free space, approximately  $3 \times 10^8$  m/s,

$V$  is the cavity volume (in m<sup>3</sup>), and

$Q$  is the quality factor (dimensionless) at  $f$ .

More generally, the number of modes within a receiver bandwidth  $\Delta f$  for a wideband non-CW (e.g., pulsed) excitation signal can be estimated as  $m\Delta f$ , where  $\Delta f \geq BW_Q$ .

## A.2.2 Ideal versus imperfect chamber performance – Effect on field uncertainty

Theory suggests that an “overmoded” condition exists when a sufficiently large number of modes are excited. In ideal overmoded condition and subject to a sufficiently efficient stirring process, the power distribution at any location fits a chi squared ( $\chi^2$ ) distribution and the field strength fits a chi ( $\chi$ ) distribution [10, 11, 23]. Both distributions are notably asymmetric around their mean value (heavy right-tailed). At lower (finite) mode densities, i.e., at lower frequencies, the distribution of received power does no longer fit a  $\chi^2$  distribution but instead a more complicated distribution [14, 15]. Also, different distributions and statistics apply to fields close to a conducting boundary, relevant to floor-standing or wall-mounted devices [16



to 18], or for empirical sampling distributions when the number of generated tuner positions  $n$  (see Clause A.3) is relatively small, typically when  $n < 30$  [27]. These differences in field distributions increase the uncertainty and width of confidence intervals of the measured field. They also affect the mean maximum or minimum field strength and its confidence intervals.

### A.3 Assessment of tuner efficiency

In order to apply statistics to data obtained from a reverberation chamber, the number of independent samples shall be known. For a given frequency, a tuner (or multiple tuners) shall alter the boundary conditions sufficiently to effect a statistically significant change in the field pattern of the chamber. Once such a change has occurred in the field structure, any samples obtained from the fields resulting from the new tuner position are said to be statistically independent from those of the previous tuner position. Tuner performance data shall be obtained in order to determine the number of statistically independent samples that a given tuner (or tuners) can provide at a desired frequency. Tuner performance data is obtained by recording the received power at  $n$  evenly spaced angular intervals over one tuner rotation. The tuner performance can then be estimated by calculating the correlation coefficient between tuner steps [20]. The correlation coefficients for multiples of a unit tuner step combine to the autocorrelation function with respect to tuner step size. A typical correlation coefficient calculation involves consecutively shifting the data vector  $x$  by one sample for each tuner step to produce  $y$  as shown below, assuming a total set of 450 samples:

D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D450  
 D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D449  
 D449, D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D448  
 D448, D449, D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D447

The correlation coefficient  $r$  can then be calculated using the following formula:

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - u_x)(y_i - u_y)}{\sqrt{\left( \frac{\sum_i^n (x_i - u_x)^2}{n-1} \right) \left( \frac{\sum_i^n (y_i - u_y)^2}{n-1} \right)}} \quad (\text{A.4})$$

$\uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow$   
 $\sigma_x^2 \qquad \qquad \qquad \sigma_y^2$

in which  $y_i$  is the same as  $x_i$  but shifted by one sample for each tuner step, and  $n$  is the number of samples taken over one tuner rotation.

#### NOTE 1

- $x_i$  and  $y_i$  are received power values. Using field strength or in-phase or quadrature field values instead of power will typically give similar, but slightly different values of  $r$ .
- $u_x$  and  $u_y$  are the mean of the original received power versus tuner position data set.

Since the distribution for  $y$  is the same as for  $x$ , it follows that

$$u_y = u_x \text{ and } \sigma_x = \sigma_y$$

The correlation coefficient  $r$  can be calculated using the correlation function built into most spreadsheets based on the original data set and the shifted data set. By convention, in this standard the data are regarded as uncorrelated when the magnitude of the correlation



coefficient for increasing shifts drops below and remains less than the value  $1/e \approx 0,37$ . Other criteria or threshold values are sometimes used in other applications. Due to the statistical nature of the correlation coefficient, this threshold value is only valid in the case of infinite  $n$ . For any given finite  $n$  and confidence level, the limit has to be lowered [21]. For example, for 95 % confidence and values of  $n$  not less than 100, the threshold of the correlation coefficient can be approximated by the equation

$$r \approx 0,37 \cdot \left( 1 - \frac{7,22}{n^{0,64}} \right) \quad (\text{A.5})$$

Dividing the total number of samples across one full rotation (e.g., 450 above) by the number of steps necessary to reduce the correlation coefficient to less than 0,37 (so-called decimation) yields an estimate of the number of independent samples the tuner can provide at a particular frequency.

**EXAMPLE** Carry out the above procedure for a chamber by rotating the mechanical tuner over  $360^\circ$  in 450 evenly spaced steps at 80 MHz, 100 MHz, and 500 MHz. If  $r$  becomes less than  $0,37 \times (1 - 7,22/450^{0,64}) = 0,32$  after 25, 15, and 5 steps of the tuner, respectively, then the tuner can be expected to deliver 18 independent samples at 80 MHz, 30 independent samples at 100 MHz, and 90 independent samples at 500 MHz. As shown in Clause A.4, the number of tuner steps required may exceed the ability of a single tuner to provide these. In these cases, a second tuner will be necessary, but this is not necessarily sufficient.

**NOTE 2** Equation (A.5) has been obtained from curve fitting to numerical data [21].

**NOTE 3** The procedure described above implies the use of equidistant tuner positions. This is known to work well for sufficiently high frequencies and for one tuner. For more than one tuner, equidistant tuner positions cannot be defined. Near the chamber LUF, symmetries of the tuner might become relevant. In that case, equidistant tuner positions are not guaranteed to be uncorrelated and a set of tuner positions has to be determined where each pair correlation is less than the limit given above. This procedure is also applicable in the case of more than one tuner. Details of the procedure are under consideration. For non-equidistant tuner positions at low frequencies, the actual positions that yield statistical independence may be dependent on the location and orientation of the antennas and, during testing, on the size and location of the EUT.

## A.4 Reverberation chamber statistics

### A.4.1 Field fluctuations

For the following discussion, it is assumed that the chamber dimensions are large compared to the excitation wavelength (the chamber is overmoded) and that the chamber has a complex geometry. The introduction of antennas and efficient tuners assures complexity in an otherwise regular cavity.

The validation procedure for this standard is based on the statistical nature of fields in complex cavities. It has been experimentally validated that the fluctuating fields in a reverberation chamber can be theoretically modelled using the appropriate statistical distributions, e.g., [9, 10, 14, 15 et 18] for (1) the received power by an antenna which is related to the chamber scalar power density and to the electric field squared (field intensity), (2) the maximum received power or the maximum electric field squared, (3) a rectangular component of the electric field, and (4) the maximum of a rectangular component of the electric field. These four distributions are different but related. Distributions for their sample averages, standard deviations, and maximum values [19], as well as for small sets of independent samples [27] are also available. Impedance mismatch and other measurement-related issues further affect the field statistics [19]. Some specific properties of some of the distributions will be discussed below.

The function of a reverberation chamber is to generate a statistically uniform (i.e., statistically isotropic, homogeneous and uniformly polarized) test environment within acceptable uncertainty and confidence limits. This is accomplished by a mechanical tuner, which is used to redistribute (diffuse) the field energy. The tuner changes the boundary conditions within the



chamber when it is moved or rotated. Once the tuner has been moved to a sufficient number of independent positions, the field variations resulting from rotating the tuner provide a set of field values involving many directions of propagation and polarization. At any location, the local field shows large and irregular fluctuations during rotation due to varying levels of constructive or destructive interference of reflected waves (phasors) from different spatial directions of incidence and polarization at this location. The magnitude and directionality of the fields is on average the same, within bounded uncertainty limits, for all points within the chamber. The terms “isotropic” and “homogeneous” are often used to refer to the environment generated by a reverberation chamber. This term is somewhat misleading since the field or energy in the environment does not exhibit equal magnitude from all directions and polarizations simultaneously, nor is the energy density equal at all locations simultaneously, hence the adjective “statistical”.

We restrict our discussion to the fields within the working volume of the chamber. The working volume is defined by points or imaginary surfaces at a distance of  $\lambda/4$  away from the chamber walls and from any antenna, tuner or other conducting object, at the lowest frequency of operation. For a chamber operating above 100 MHz, the distance is 0,75 m. A typical reverberation chamber facility is shown in Figure A.5.

#### A.4.2 Required number of independent samples

Given the distribution of the fields within a cavity, the number of samples that has to be taken in order to determine the level of uncertainty for the field can be determined. Figure A.6 shows a theoretical prediction for the number of independent samples (boundary condition changes or steps of the mechanical tuners) required to obtain a 6 dB field uncertainty at a 95 % level of confidence, for a specific cavity with dimensions as indicated in the figure. As Figure A.6 shows, at a lower mode count  $M$ , as defined by Equation (A.3), the required number of independent samples increases rapidly with decreasing frequency. In this calculation, the field is undermoded and no longer obeys an ideal chi distribution, but a more complicated distribution [15], [27], governed by an additional parameter that depends on the maximum achievable number of an independent tuner position at the chosen frequency of operation, which in turn depends on the shape and size of the chamber. If the confidence level is lowered, then the number of samples required to obtain the same level of uncertainty is reduced. In practice, a mechanical tuner may not be capable of providing the number of independent samples required to yield the desired performance within a given cavity. For this reason, tuner performance should be evaluated as detailed in Clause A.3 to determine the number of samples that can be provided in a given cavity at a given frequency.

#### A.4.3 Effect of tuner on the mean field

For an ideal reverberation chamber, the volumetric (i.e., spatial) mean value of the field for a fixed boundary condition and the “ensemble” average, are equivalent [9, 10, 16]. An ensemble average is the average of the field at a fixed location for multiple boundary conditions. Boundary condition changes are typically achieved by rotating a mechanical tuner, but can also occur from changes in the configuration of objects such as antennas, test devices, and supporting instrumentation and equipment.

Figure A.7 shows the probability density function (PDF) of the field at a location within an ideal reverberation chamber normalised by the “true” volume or ensemble average (expected value). As shown in this figure, the field in the chamber at an arbitrary location for a fixed single boundary condition or at a fixed single location and arbitrary boundary condition (tuner position) ( $N = 1$ ) can vary by more than 30 dB.

Figure A.8 shows that, as the number of independent boundary conditions (tuner steps) is increased, the measured mean of the chamber field at any given location in the chamber converges toward the “true” ensemble mean value. The measured mean value is the “expected value” of multiple samples. The width of each curve is a measure of the spread of field values (uncertainty interval) that can be expected at an arbitrary location in the working volume for  $N$  samples. The uncertainty of the mean field decreases as  $1/\sqrt{N}$  [19]. Figure A.8 also shows that for 12 tuner steps the uncertainty of the mean field is about 5 dB at the 95 %



confidence interval and about 2,4 dB for 100 tuner steps. This would correspond to an eight-fold increase in test time for a 2,6 dB reduction in uncertainty of the mean field level.

#### A.4.4 Effect of tuner on the maximum chamber field

The distribution for  $N = 1$  shown in Figure A.7 is valid for both mean and maximum fields, because the maximum, minimum and mean measured at a location are all the same value, for a fixed position of the tuner. The PDF for the maximum field at an arbitrary location within a chamber is shown in Figure A.9. As  $N$  increases, the distribution moves to the right and gets narrower (improved uncertainty). The reduction in uncertainty for the maximum field level is initially very rapid as the number of tuner steps is increased and then slows as  $N$  becomes larger.

Figure A.9 shows that for 12 tuner steps the uncertainty of the maximum field is about 7,2 dB at the 95 % confidence interval and about 4,8 dB for 100 tuner steps. This would correspond to an eight-fold increase in test time for a 2,4 dB reduction in uncertainty in the maximum field level. Generally, the width of the uncertainty interval for the mean-normalised maximum or minimum value decreases more slowly than  $1/\sqrt{N}$  [19]. Also, increasing the number of tuner steps from 12 to 100 steps increases the expected value of the maximum field by about 3 dB.

Since the PDF for the maximum field applies at any arbitrary location, as it does with the mean field, the PDF is also a measure of the spatial uniformity for  $N$  samples of the maximum field over the working volume of the chamber. With the aid of the field statistics, a measurement of the mean field strength at one location allows to estimate the maximum field strength at any other location inside the working volume. However it does not allow to predict at which particular tuner position this maximum value will be reached. This tuner position is different for each spatial location.

### A.5 Chamber validation

#### A.5.1 General

The purpose of the validation is to verify that the fields generated have the same magnitude, within a defined uncertainty interval, for all polarizations and for all directions of arrival at all locations within the working volume, for a given number of tuner steps. In order to meet this requirement the use of isotropic probes, which allow access to each axis of the probe, is required in order to perform the validation. A calibrated electrically short dipole antenna may be substituted (see Clause B.1). The validation procedure should be performed when commissioning the chamber and after major modifications.

The empty chamber validation procedure is based on a comparison of the peak fields measured by  $E$ -field probes to the mean received power of a reference antenna. To enhance accuracy, the reference antenna mean data is obtained for eight locations within the working volume. Even then, the effect of the limited number of locations on the uncertainty can be substantial for small  $N$ . An estimate of the uncertainty of the field uniformity level of the chamber (but for rectangular field components only) is calculated in [19].

The number of samples recommended for validation is based on a “theoretical” chamber of approximately 3 m × 7 m × 15 m size and typical  $Q$  for a chamber constructed of welded steel. The number of samples required was rounded up to account for variations from this “theoretical” chamber in order to ensure a conservative test. It is possible that a larger chamber or one with a lower  $Q$  than the “theoretical” chamber could meet this validation requirement using less than the recommended number of steps.

#### A.5.2 Validation procedure

The validation procedure collects  $E$ -field probe data (maximum data only), as well as chamber input power and the maximum and mean received power from a reference antenna placed within the working volume. The probe data are used to determine field uniformity. The



chamber input power and probe data are used to determine the chamber validation factor (CVF). The mean received power from the reference antenna and chamber input power are used to calculate the antenna validation factor (AVF). The AVF is used as a reference value when determining if the chamber has been significantly “loaded” by equipment under test (EUT). The maximum received power from the reference antenna is used to verify the probe readings. Probe data are collected from the eight locations that form the corners of the “volume of uniform field” or “working volume” as shown in Figure A.10. Each time the probe is moved to a new location, the reference antenna is moved to a new location within the working volume. The orientation of the reference antenna relative to the chamber axes is also changed by at least 20° relative to each axis at each position. This ensures that any bias in the polarization of the local field is detected. A minimum of eight locations for both the probe and reference antenna is required.

Table B.1 lists the number of tuner steps recommended for performing the validation. The number of steps may need to be decreased or increased to optimise performance. The minimum number of tuner steps shall be at least 12.

NOTE 1 Once a chamber has been shown to operate properly over a frequency span of 300 MHz to 400 MHz at the minimum number of tuner steps (i.e., 12), the number of locations may be reduced to three. For the chamber used to collect the data presented in this annex, the reduction in the number of locations occurred at 1 000 MHz.

Every chamber will have a frequency below which it is no longer overmoded [5, 10, 14] and hence can then no longer be used as a reverberation chamber. This frequency will mostly depend on chamber size, and the cut-off will be gradual rather than abrupt as frequency decreases. Chamber loading by an EUT or by a conducting or lossy artefact may also reduce the LUF (see A.5.4).

NOTE 2 In some cases, it is possible to compensate for decreased modal density that results as the operational frequency approaches the “undermoded” condition. In general and with care, compensation can be achieved by increasing the number of tuner steps, but effects may be limited and specific to a configuration.

### A.5.3 Field uniformity

The goal of a reverberation chamber is to generate a statistically uniform environment for all locations within the defined working volume. The procedure just described is designed to measure the expected magnitude and uniformity for a given chamber using a given number of tuner steps. A typical set of probe data obtained using the validation procedure (x-axis data only, for clarity) is shown in Figure A.11. Figure A.12 shows the data of Figure A.11 normalized to the mean of the eight maximum x-axis probe readings at each frequency (B.1.2 (10) (a)). The data show that the measured field uniformity is about  $\pm 10$  dB at 100 MHz and decreases as frequency increases. Also, note that data at higher frequencies show good uniformity even though the number of tuner steps is decreased.

NOTE 1 The number of steps used to collect the data shown in Figure A.12 was set prior to determining the values in Table B.1. This explains the revision of 20 steps to 18 steps and 16 steps to 18 steps.

At present, there are two schools of thought as to which is the best method to determine acceptable uniformity. For the first method [29], acceptable uniformity is decided by throwing away 25 % of the data that have the most variation and then requiring the remaining data to be within a given limit. In the second method [30, 31], acceptable uniformity is determined by calculating the standard deviation of all the data and requiring that the standard deviation be within a given limit. The first method’s major drawback is that there is no “weight” given to the data that are thrown away. This could result in the uncertainties being essentially unknown. For the purposes of this standard, it has been agreed to use the standard deviation method, because all data are then considered and given appropriate weight.

The standard deviation of the data shown in Figure A.12 is shown in Figure A.13. The data show that in this case the standard deviation exceeded 3 dB below about 200 MHz. For example and by way of reference, the tolerance for the commercial aircraft avionics standard is also shown [30].



NOTE 2 The chamber is considered to pass the field uniformity requirements provided that the standard deviation for both the three individual field components ( $E_x$ ,  $E_y$ , and  $E_z$ ) and the total data set ( $E_{Total}$ ) are within the specified tolerance. The total data set consists of the 24 measurements made by combining the three individual field components ( $E_x$ ,  $E_y$ , and  $E_z$ ) from the 8 probe locations. The chamber used to collect this data could not be used below 130 MHz, according to the limit in [30], unless the field uniformity is improved [25]. A committee made up of representatives from both industry and government developed the proposed limit.

NOTE 3 An exceptional allowance is made for increased field non-uniformity, that is to say, up to 4 dB between 100 MHz and 400 MHz, compared to 3 dB at any frequency above 400 MHz (see Figure A.13). This allowance was influenced by both the desire to have this IEC standard harmonized with other standards [29], as well as for economical reasons. Chamber dimensions drive the LUF. Often, the ceiling height of most facilities results in lower performance. The relaxed field uniformity values below 400 MHz allows for testing of very large EUTs (e.g., aircraft) in a reverberation chamber without a need for an excessively large chamber.

NOTE 4 The total data set is NOT the commonly used root sum of the squares (RSS) of  $E_x$ ,  $E_y$ , and  $E_z$  [30].

#### A.5.4 Chamber *E*-field

The “expected” value of the amplitude of the chamber *E*-field during the validation is simply the arithmetic average of the 24 maximum probe readings (the mean of the maximums). The “expected value” is the value to which the chamber is calibrated (see Figure A.9).

It is also possible to estimate the chamber *E*-field ( $E_{Est}$ ) based on the reference antenna measurements. Equation (A.6):

$$E_{Est} = \left\langle \frac{8\pi}{\lambda} \sqrt{5 \frac{P_{MaxRec}}{\eta_{rx}}} \right\rangle_n \quad (A.6)$$

was derived using methods similar to those used to derive expressions for the mean field [11] and gives an estimate of the chamber *E*-field (in V/m) based on the maximum readings from the reference antenna averaged over the number of antenna locations or orientations, where

- $P_{MaxRec}$  is the maximum received power (in W) over the given number of tuner steps at an antenna location or orientation,
- $\eta_{rx}$  is the antenna efficiency factor for the receive antenna which can be assumed (if not known) to be 0,75 for a log periodic antenna and 0,9 for a horn antenna. This parameter can be determined from the information contained in Annex I, and
- $n$  is the number of antenna locations and orientations.

For all measurements, it is assumed that the forward input power is the same for all data collected. If so, then the data can be normalized after taking the average of the probe readings. If not, then the probe readings need to be equalized by normalizing to the value of the input power that corresponds to that probe reading. Normalizing the *E*-field to the chamber input power is done by dividing the probe reading by the square root of the input power. This can also be done for the estimated *E*-field based on a reference antenna.

It is recommended to perform a cross-check by comparing the average *E*-field measured by the probes to the estimated expected *E*-field based on the eight antenna measurements. Any discrepancies greater than  $\pm 3$  dB between the probe and antenna based measurements, should be resolved (see also Clause 8). Note that significant disagreement at the lower frequencies is expected due to loading caused by the transmitting and receiving antennas. For this reason, the agreement between the two methods is not expected at frequencies where the difference between the chamber input power and the measured maximum received power from the reference antenna is 10 dB or less.

#### A.5.5 Loading effects

When an EUT or other object is placed inside a reverberation chamber there is the possibility that the EUT will “load” the chamber. The energy absorbed by the EUT or other objects is



then no longer available to generate the desired environment. For this reason, the chamber input power needs to be increased to compensate for this loading. Any “loading” caused by reduction of the working volume (even when the EUT is non-absorbing) is limited by the requirement that the EUT and all supporting equipment shall not occupy more than 8 % of the total chamber volume (see Clause D.1).

NOTE 1 The source of the fields is actually the reflection of RF energy from the walls. Although an antenna is used to inject RF energy into the chamber, that energy is not directed at the EUT. If the EUT absorbs energy then that energy is no longer available to contribute to the generation of the test environment. The following data will demonstrate the concept.

Prior to performing any test, a check for loading effects shall be made. This is done by measuring the mean power received by the reference antenna for the same number of tuner steps used to perform the validation with the EUT in place. The data from this single measurement are then compared to the eight measurements from the validation. If the mean received power measured with the EUT in place does not lie within the acceptable range of the mean field measured during the validation (i.e., if it is significantly greater or smaller than the validation data), then the chamber is considered to have been loaded by the EUT. A correction factor will then be required when calculating the input power necessary to generate the desired test field. This factor is referred to as the “chamber loading factor” (CLF). The CLF is obtained by taking the ratio between a measurement taken with the EUT in place and the mean or “expected value” from the eight measurements taken during the validation, i.e., for the same configuration except for the EUT being removed [30].

To determine the limit to which a chamber may be loaded, an evaluation shall be performed to evaluate the field uniformity under severe loading conditions (B.1.6). An example of such an evaluation is shown in Figure A.14. The working volume of this reverberation chamber was loaded with 27 pieces of 122 cm pyramidal absorber. Figure A.15 shows the amount of loading induced into the chamber by the absorbers. The chamber loading, or the amount of loading, over the frequency range of 100 MHz to 18 GHz varied from a maximum of about 23 dB to a minimum of 10 dB with a mean loading of about 14 dB. Figure A.16 shows the standard deviation of the fields in the loaded chamber. The standard deviation of the loaded chamber, while varying slightly from the empty chamber validation shown in Figures A.12 and A.13, did not show significant degradation.

NOTE 2 The standard deviation increased (instead of decreased) by approximately 0,5 dB, most probably due to probe proximity to absorber, which causes the field magnitude to adopt a different distribution with larger uncertainty [14].

#### A.5.6 Generating a test field – Immunity

Injecting the proper amount of power into the chamber generates the desired test environment. The power necessary to generate the desired field strength can be calculated using Equation (A.7).

$$P_{\text{input}} = \left[ \frac{E_{\text{Test}}}{\bar{E} \cdot \sqrt{CLF}} \right]^2 \quad (\text{A.7})$$

where

$E_{\text{Test}}$  is the required field strength (in V/m),

$CLF$  is the chamber loading factor (Clause B.2 (7)) (dimensionless), and

$\bar{E}$  is the average of the maximum E-field values measured by the respective probes divided by the square root of the input power used during validation (in (V/m)/W<sup>0,5</sup>) (see B.1.2 (9)).

Note that the probe measurements used to determine the chamber  $E$ -field are the rectangular components of the probe, not the RSS.



### A.5.7 Determining radiated power – Emissions

The amount of RF power radiated by a device placed in the chamber can be determined by measuring the amount of power received by the reference antenna and correcting for the insertion loss of the chamber [4]. The power radiated from a device can be calculated using either average or peak received power from a given number of tuner steps and/or tuner rotations. Equation (A.8) is used for mean-received-power-based measurements, while Equation (A.9) is used for peak-received-power-based measurements. The advantage of using measurements based on mean power is a lower uncertainty. The disadvantage is that the measurement system shall have a sensitivity that is 20 dB lower than the actual mean to get an accurate average measurement and intermittent signals may be artificially lowered due to insufficient sampling.

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{AveRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CVF} \quad (\text{A.8})$$

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{MaxRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CLF \times IL} \quad (\text{A.9})$$

where

- $P_{\text{Radiated}}$  is the radiated power (in W) from the device within the measurement band width,
- $CVF$  is the chamber validation factor (dimensionless) (Clause B.2 (6)),
- $CLF$  is the chamber loading factor (dimensionless) (Clause B.2 (7)),
- $IL$  is the chamber insertion loss (dimensionless) (B.1.4),
- $P_{\text{AveRec}}$  is the received power (in W) as measured by the reference antenna averaged over the number of tuner steps (B.1.2 (5)),
- $P_{\text{MaxRec}}$  is the maximum power received (in W) over the number of tuner steps (B.1.2(5)), and
- $\eta_{\text{Tx}}$  is the antenna efficiency factor (dimensionless) for the Tx antenna used in calibrating the chamber and can be assumed to be 0,75 for a log periodic antenna and 0,9 for a horn antenna.

NOTE CISPR 16-1-1 should be consulted when selecting detectors of measuring receivers.

### A.5.8 Q-factor of the chamber for CW and pulse testing

The validation is based on using CW excitation. When using modulated waveforms, distortion caused by the chamber quality factor or “Q” shall be considered (Clause B.3). The chamber Q can be calculated using Equation (A.10):

$$Q = \left( \frac{16\pi^2 V}{\eta_{\text{Tx}} \eta_{\text{Rx}} \lambda^3} \right) \left( \frac{P_{\text{AveRec}}}{P_{\text{Input}}} \right)_n \quad (\text{A.10})$$

where

- $\eta_{\text{Tx}}$  and  $\eta_{\text{Rx}}$  are the antenna efficiency factors (dimensionless) for the Tx and Rx antenna, respectively and can conservatively be assumed to be 0,75 for a log periodic antenna and 0,9 for a horn antenna,
- $V$  is the chamber volume (in units  $\text{m}^3$ ),
- $\lambda$  is the free space wavelength (in m) at the specific frequency,
- $P_{\text{AveRec}}$  is the averaged received power (in units W) for the reference antenna,
- $P_{\text{Input}}$  is the chamber input power (in W) [30], and
- $n$  is the number of antenna locations and orientations used to collect the validation data at the frequency being evaluated.



For pulse testing the chamber time constant  $\tau$  is given by Equation (A.11)

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f} \quad (\text{A.11})$$

where

$Q$  is the quality factor of the chamber, calculated using (A.10), and

$f$  is the test frequency (in Hz).

The chamber time constant should not be greater than a fraction 0,4 of any test waveform pulse width. If it is, however, then absorber shall be added to the chamber or the pulse width should be increased. If absorber is used, add absorber until the time constant requirement is satisfied with the least possible amount of absorber. A new *CLF* shall be obtained if absorber is used. If the loading due to the absorber is greater than that obtained in the chamber loading verification (B.1.6), then the chamber validation shall be repeated.

## A.6 Reference documents

- [1] BECKER, GE. and AUTLER, SH., Water vapor absorption of electromagnetic radiation in the centimeter wave-length range, *Phys. Rev.*, Sep. 1946, vol. 70 no. 5/6, pp. 300–307.
- [2] LAMB, WE. (Jr.), Theory of a microwave spectroscope, *Phys. Rev.*, Sep. 1946, vol. 70 nos. 5/6, pp. 308–317.
- [3] MEYER, E., HELBERG, H.-W., and VOGEL, S., Hallraumesstechnik und Bau eines grossen Hallraums für elektromagnetische Wellen, *Z. Angew. Physik*, Aug. 1960, vol. 12 no. 8, pp. 337–346.
- [4] CORONA, P., LATMIRAL, G., PAOLINI, E., and PICCIOLI, L., Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, *IEEE Trans. EMC.*, vol. 18 no. 2, May 1976, pp. 54–59; Comments and corrections, *IEEE Trans. EMC*, vol. 18 no. 4, Nov. 1976, p. 205.
- [5] CRAWFORD, ML. and KOEPKE, GH., Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements, National Bureau of Standards (US) Technical Note 1092, April 1986.
- [6] CORONA, P., LADBURY, J., and LATMIRAL, G., Reverberation-chamber research then and now: a review of early work and comparison with current understanding, *IEEE Trans. EMC*, Feb 2002, vol. 44 no. 1, pp. 87–94.
- [7] BÄCKSTRÖM, M., LUNDÉN O., and KILDAL, P.-S., Reverberation Chambers for EMC Susceptibility and Emission Analyses, *Review of Radio Science 1999-2002*, Chapter 18, Wiley-Interscience, Inc., New York, 2002.
- [8] ARNAUT, LR., On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, *IEEE Trans. EMC*, Nov. 2005, vol. 47 no. 4, pp. 781–804.
- [9] KOSTAS, J. G. and BOVERIE, B., Statistical model for a mode-stirred chamber, *IEEE Trans. EMC*, Nov. 1991, vol. 33 no. 4, pp. 366–370.
- [10] HILL, DA., Electromagnetic theory of reverberation chambers, National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1506, Dec. 1998.



- [11] LADBURY, JM., KOEPKE GH., and Camell, DG., Evaluation of the NASA Langley research center mode-stirred chamber facility, National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1508, Jan. 1999.
- [12] ARNAUT, LR., Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies, IEEE Trans. EMC, Nov. 2001, vol. 43 no. 4, pp. 637–653.
- [13] MARVIN, AC., ANGUS, JAS., DAWSON, JF., and CLEGG, J., Enhancements to stirred mode chambers by the use of pseudo-random phase reflection gratings, Proc. EMC'94 Int. Symp. EMC, Rome, Italy, 1994, pp. 218–221.
- [14] ARNAUT, LR., Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, Aug. 2002, vol. 44 no. 3, pp. 442–457.
- [15] ARNAUT, LR., Limit distribution for imperfect electromagnetic reverberation, IEEE Trans. EMC, May 2003, vol. 45 no. 2, pp. 357–379.
- [16] DUNN, JM., Local, high-frequency analysis of the fields in a mode-stirred chamber, IEEE Trans. EMC, Feb. 1990, vol. 32 no. 1, pp. 53–58.
- [17] HILL, DA., Boundary fields in reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, May 2005, vol. 47 no. 2, pp. 281–290.
- [18] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary, IEEE Trans. EMC, May 2006, vol. 48 no. 2, pp. 359–371.
- [19] ARNAUT, LR. Measurement uncertainty in reverberation chambers - I. Sample statistics, National Physical Laboratory (UK), Report TQE 2, Ed. 2.0, Dec. 2008. [[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/TQE2.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf)]
- [20] LUNDÉN, O. and BÄCKSTRÖM, M., Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers, evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, Aug. 2000, pp. 11–16.
- [21] KRAUTHÄUSER, H. G., WINZERLING, T., NITSCH, J., EULIG, N., and ENDERS, A., Statistical interpretation of autocorrelation coefficients for fields in mode-stirred chambers. Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Chicago, IL, Aug. 2005, pp. 550–555.
- [22] LEHMAN, TH., A statistical theory of electromagnetic fields in complex cavities, Note 494, USAF Phillips Laboratory Interaction Note Series, May 1993.
- [23] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Evaluation of the NPL stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques, National Physical Laboratory Report (UK), Report CEM 11, Aug. 1998.
- [24] FREYER, GJ., HATFIELD, MO., JOHNSON, DM., and SLOCUM, MB., Comparison of measured and theoretical statistical properties of complex cavities, Proc. IEEE Int. Symp. on EMC, Santa Clara, CA, Aug. 1996, pp. 250-253.
- [25] LADBURY, JM. and GOLDSMITH, K., Reverberation chamber verification procedures, or how to check if your chamber ain't broke and suggestions on how to fix it if it is, Proc. IEEE Int. Symp. on EMC, Washington DC, Aug. 2000, pp.17-22.
- [26] LADBURY, JM., Reverberation chamber relationships: corrections and improvements, or three wrongs can (almost) make a right, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Seattle, WA, Aug. 1999, pp.1-6.



- [27] ARNAUT, LR., Sampling distributions of random electromagnetic fields in mesoscopic or dynamical systems, Phys. Rev. E, vol. 80 no. 3, 036601, 2009.
- [28] LIU, B.-H., CHANG, DC., and MA, MT., Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber, National Bureau of Standards (US), Technical Note 1066, 1983.
- [29] IEC 61000-4-3, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
- [30] RTCA/DO-160E, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment (Change Notice to Section 20), Dec. 2004.
- [31] MIL-STD-461E, Requirements for the control of electromagnetic interference emissions and susceptibility, Aug. 1999.
- [32] MIL-STD-1377, Effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance, Aug. 1977.



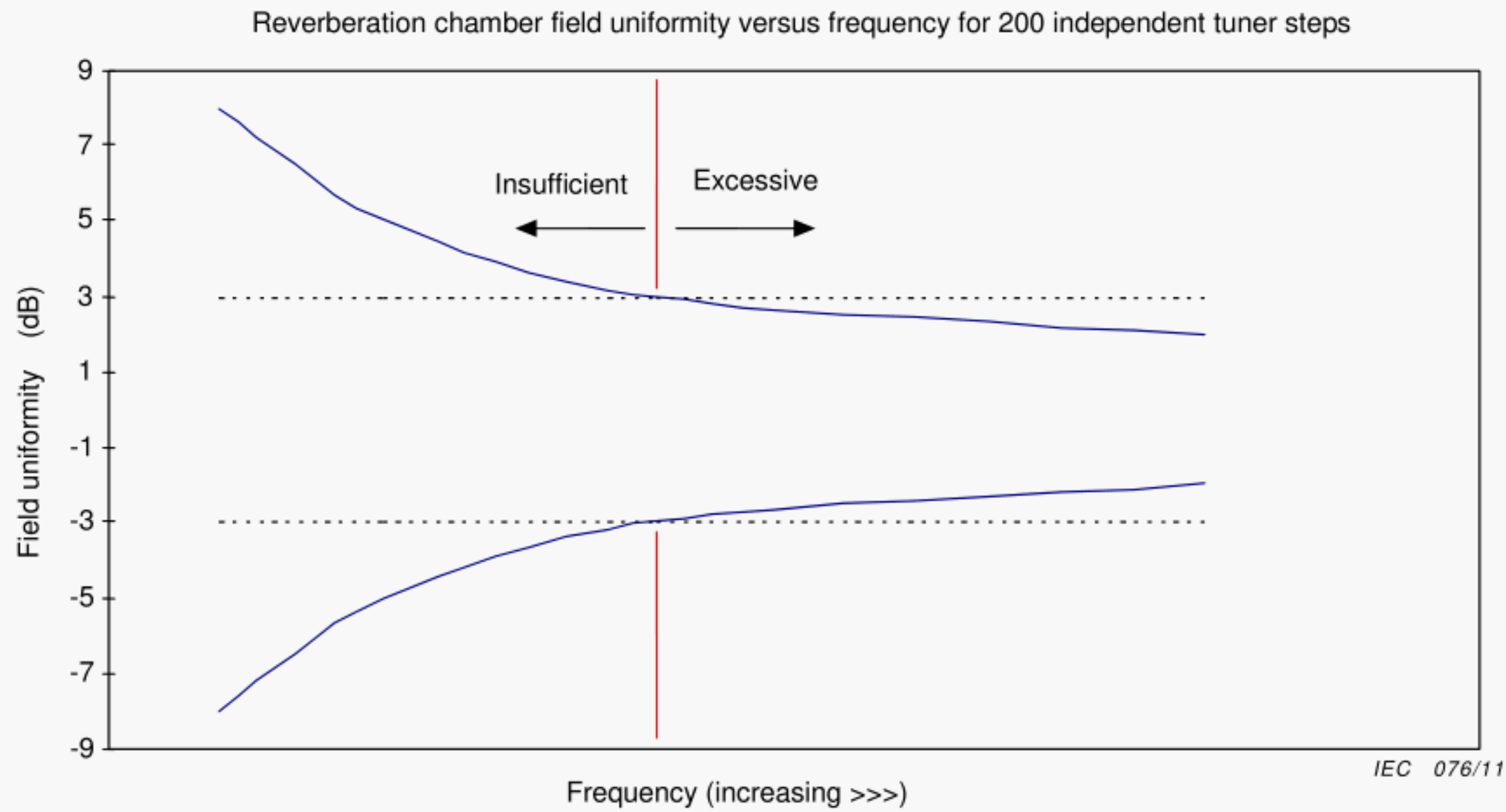
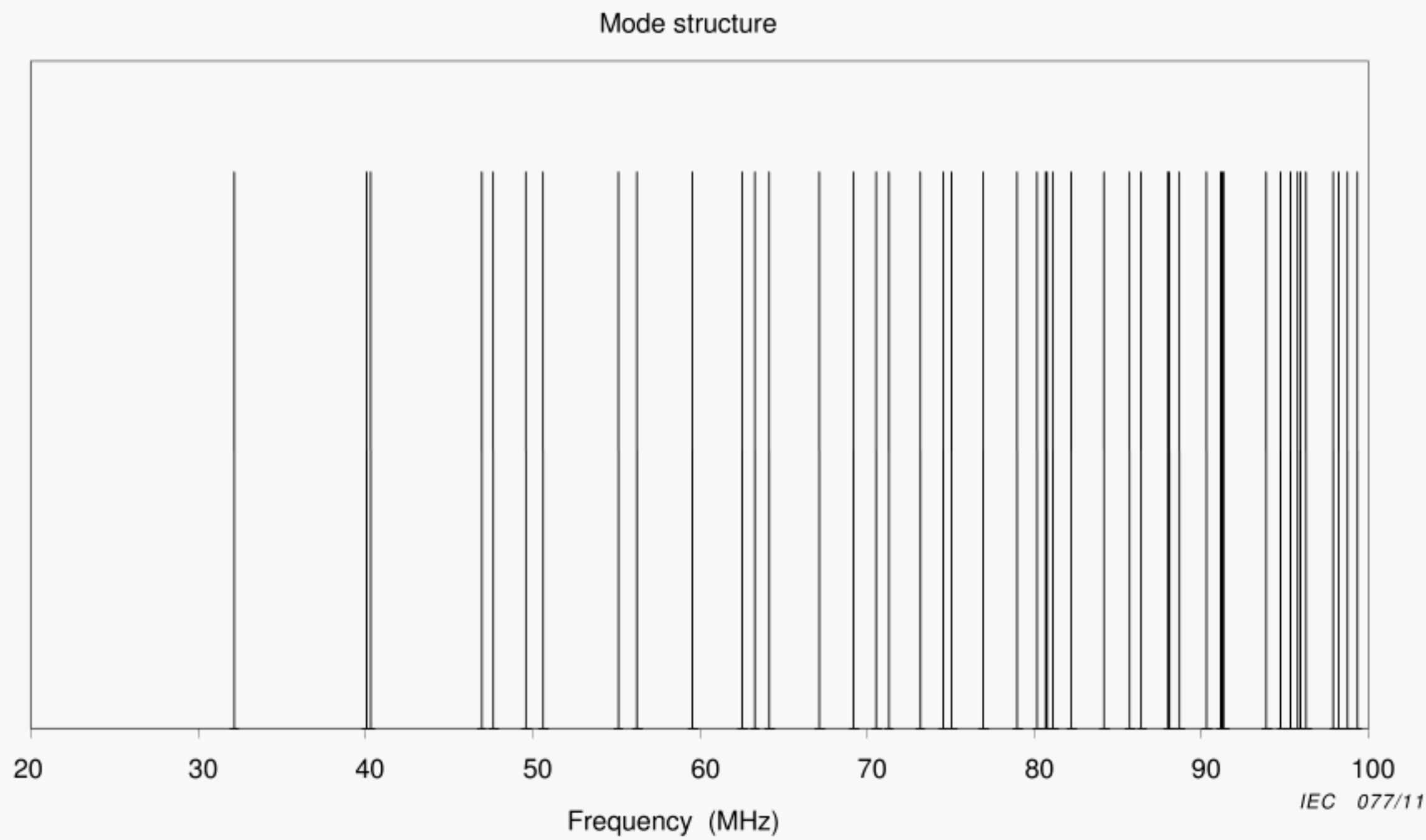


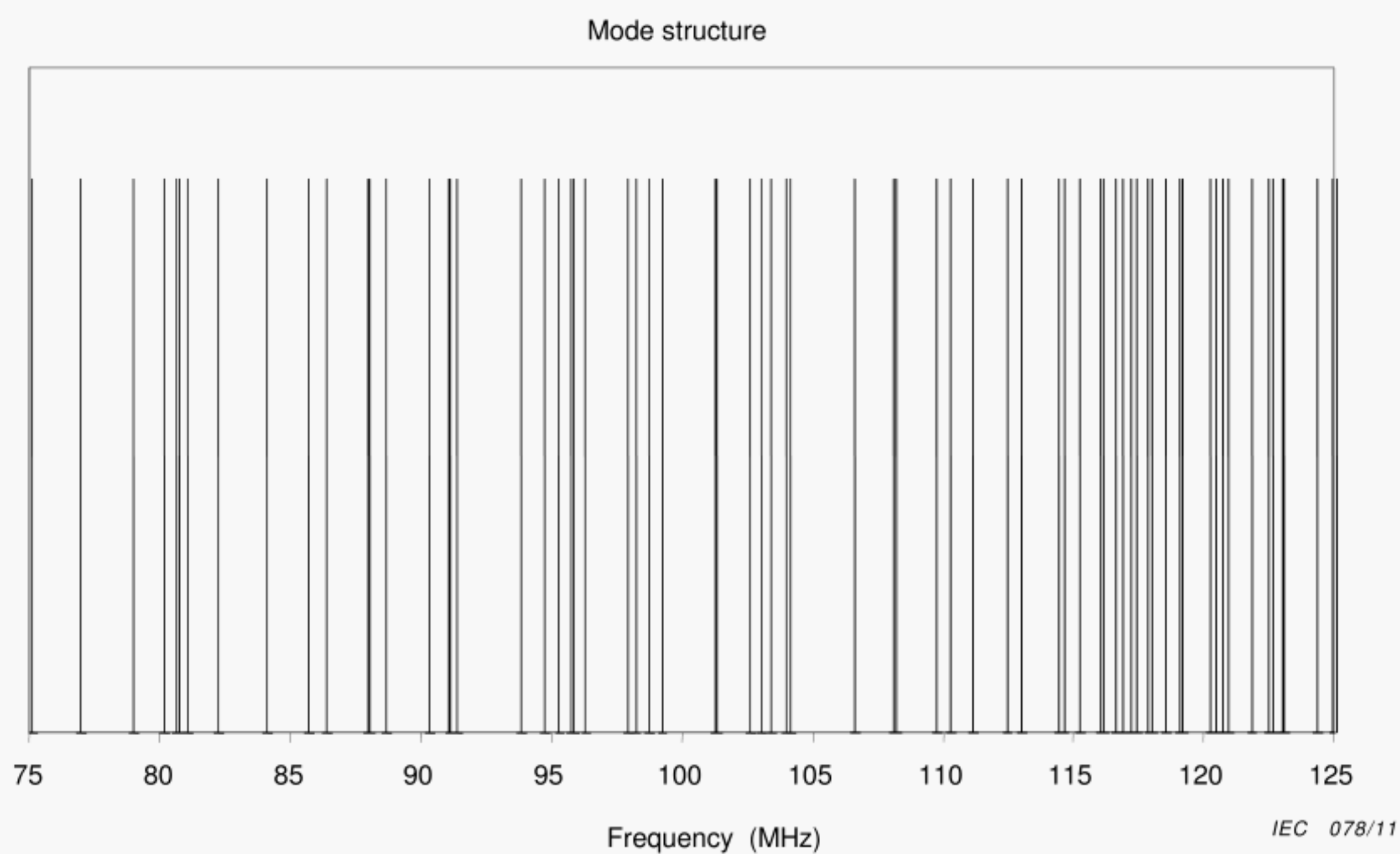
Figure A.1 – Typical field uniformity for 200 independent tuner steps



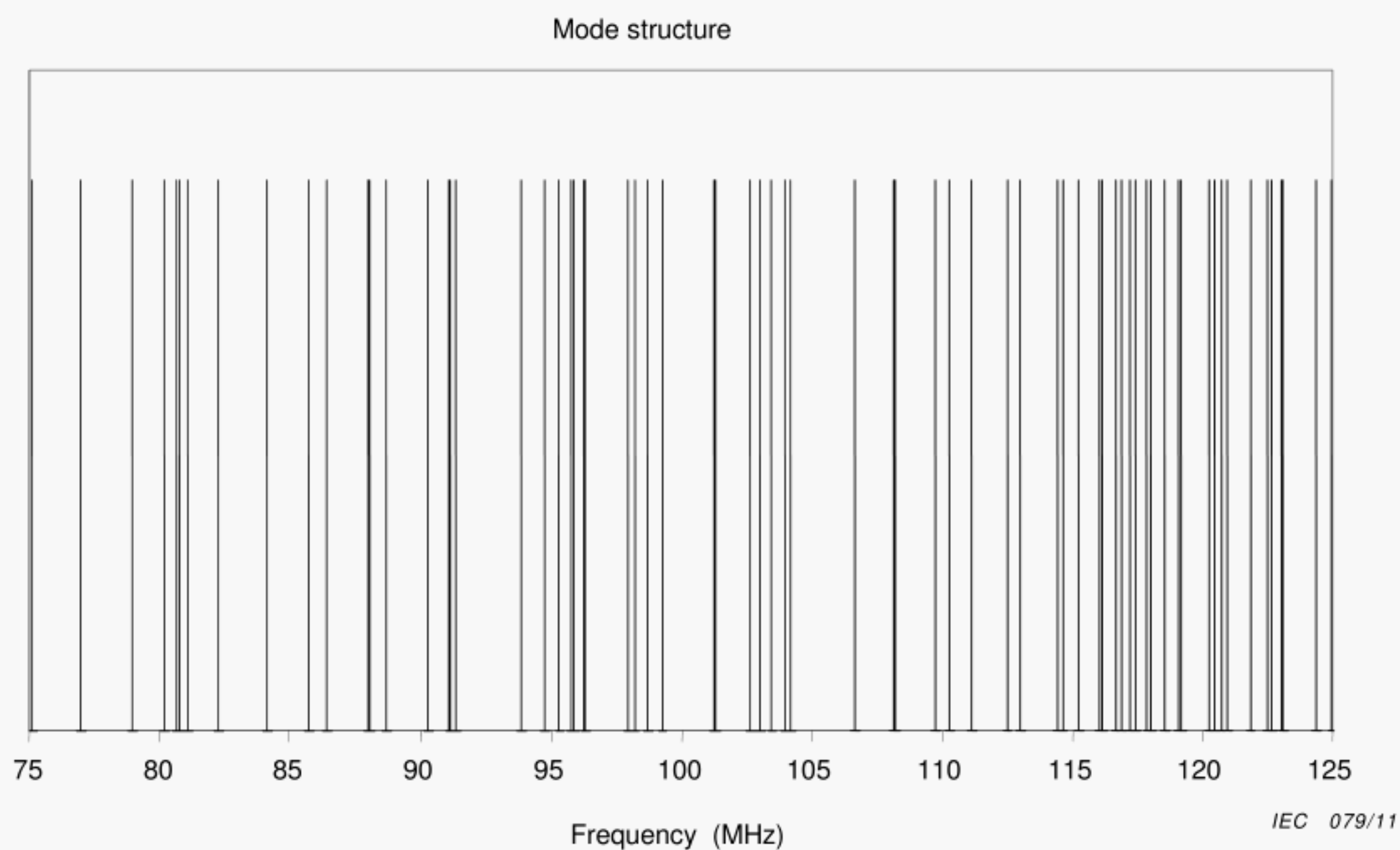
NOTE Vertical axis has no meaning other than to represent the presence of a mode.

Figure A.2 – Theoretical modal structure for a 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m chamber





**Figure A.3 – Theoretical modal structure with small Q-bandwidth (high  $Q$ ) superimposed on 60<sup>th</sup> mode**



**Figure A.4 – Theoretical modal structure with greater Q-bandwidth (lower  $Q$ ) superimposed on 60<sup>th</sup> mode**



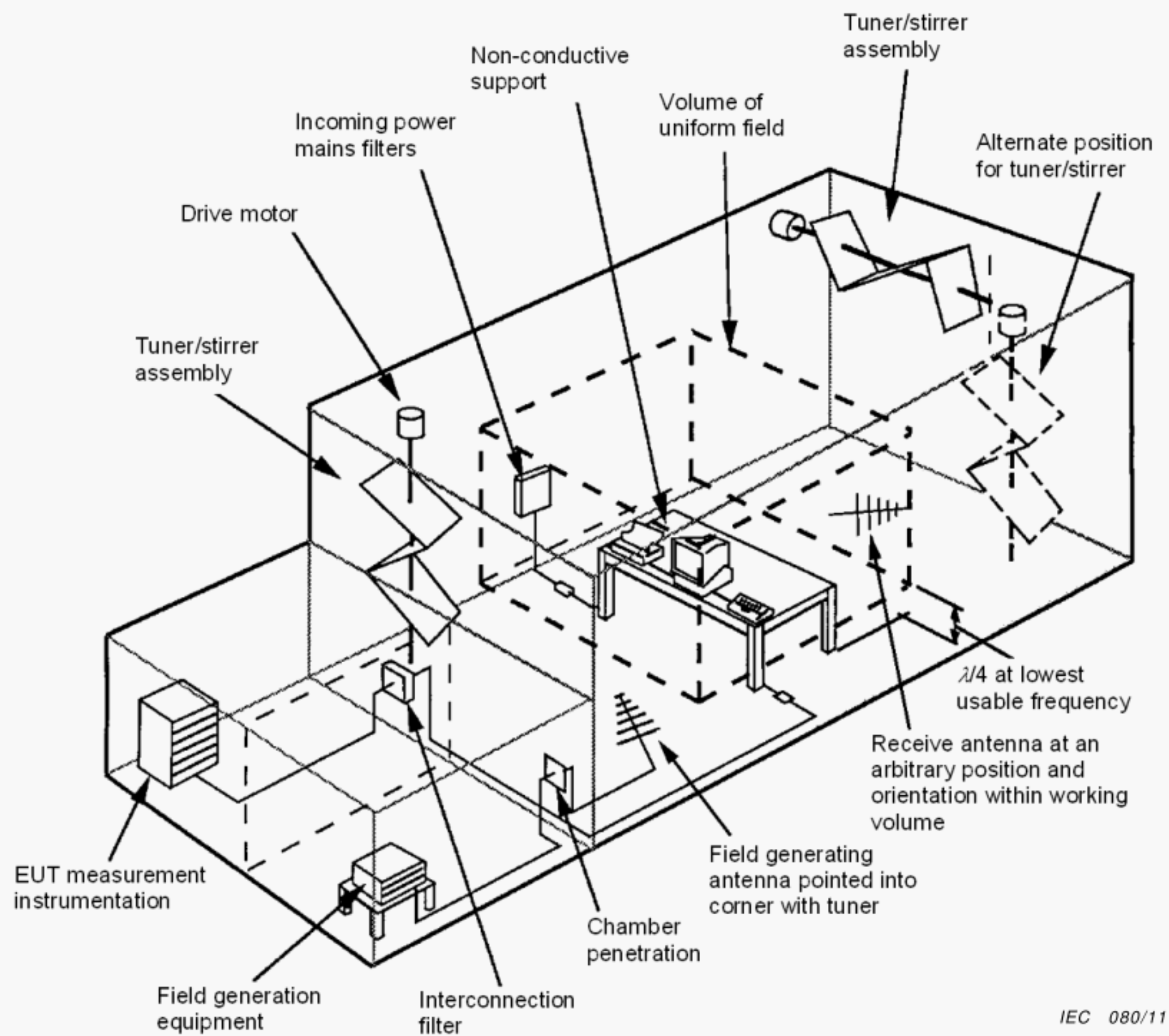
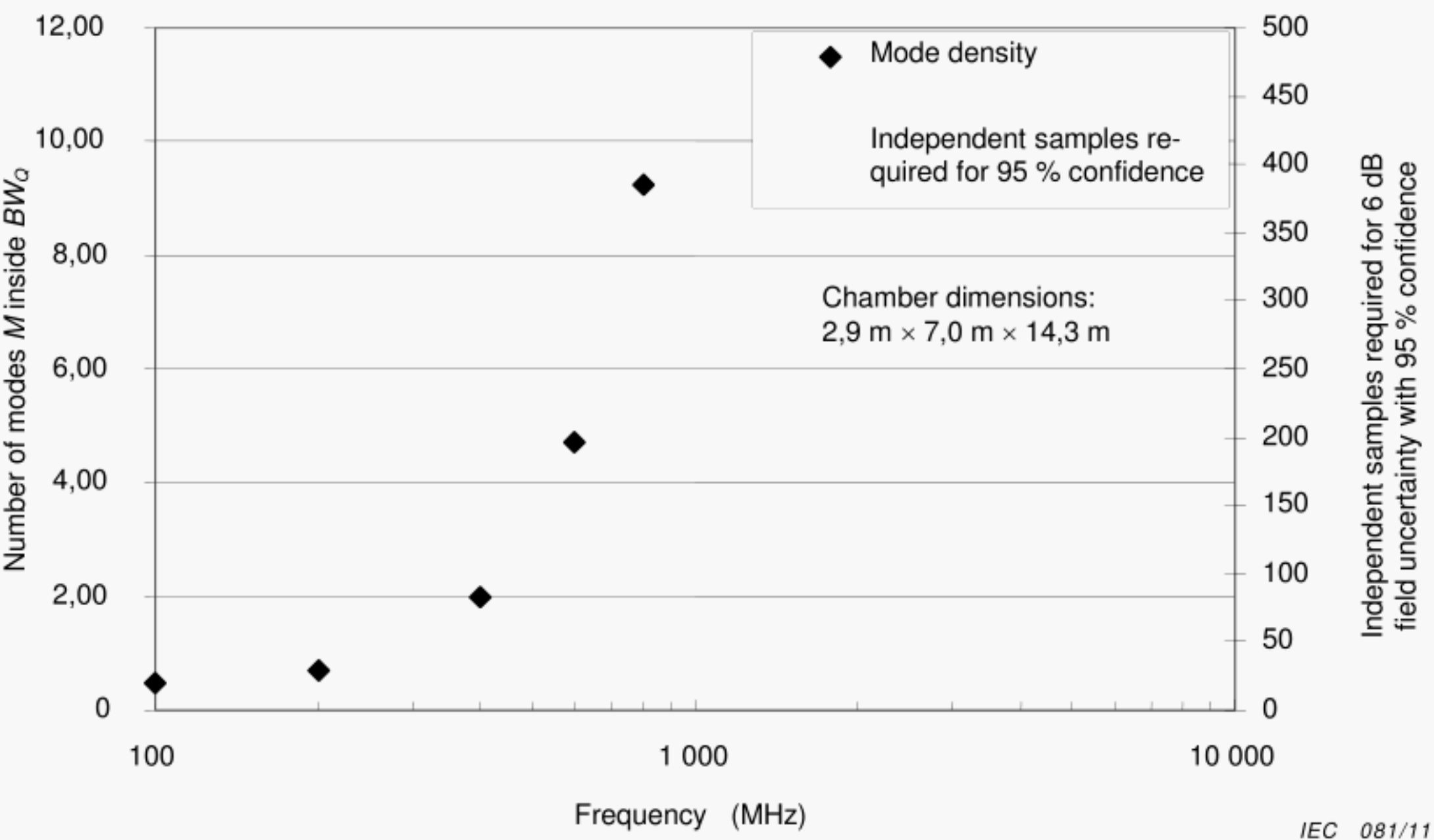


Figure A.5 – Typical reverberation chamber facility

Modes/ $BW_Q$  and sampling requirements for 6 dB field uncertainty with 95 % confidence



NOTE See Equation (A.3) on calculating  $M$ .

Figure A.6 – Theoretical sampling requirements for 95 % confidence



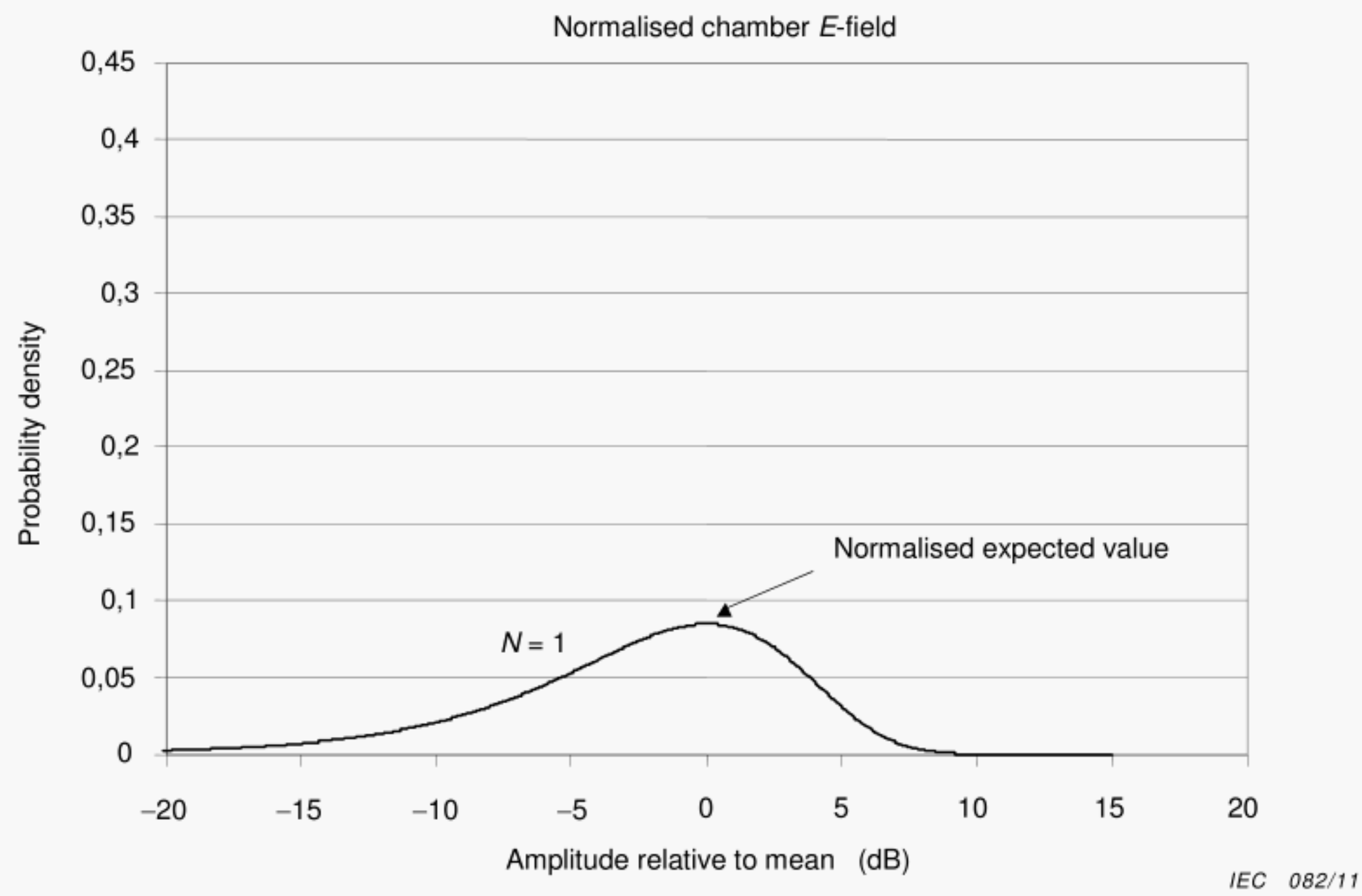


Figure A.7 – Normalized PDF of an electric field component at a fixed location for a measurement with a single sample

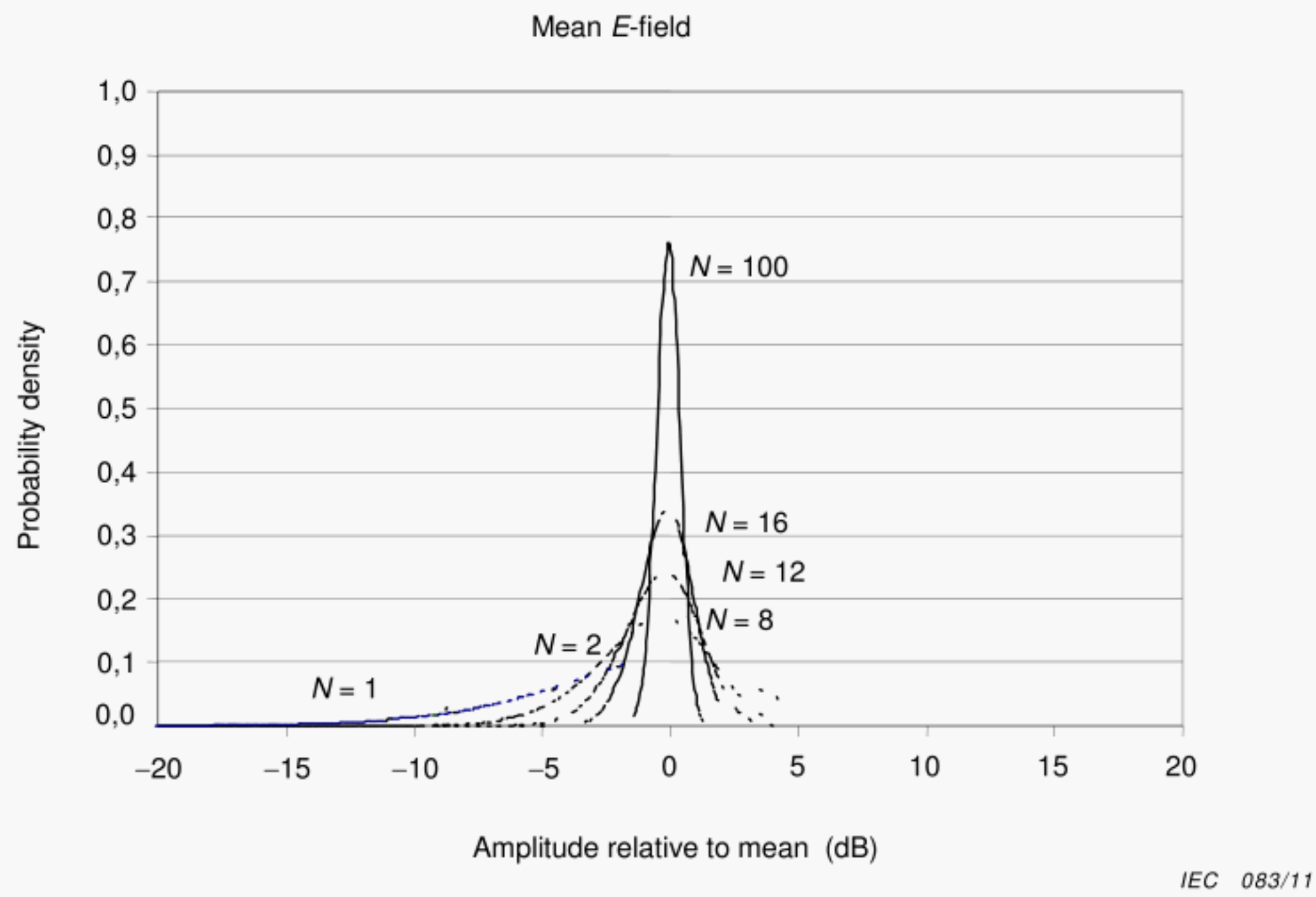
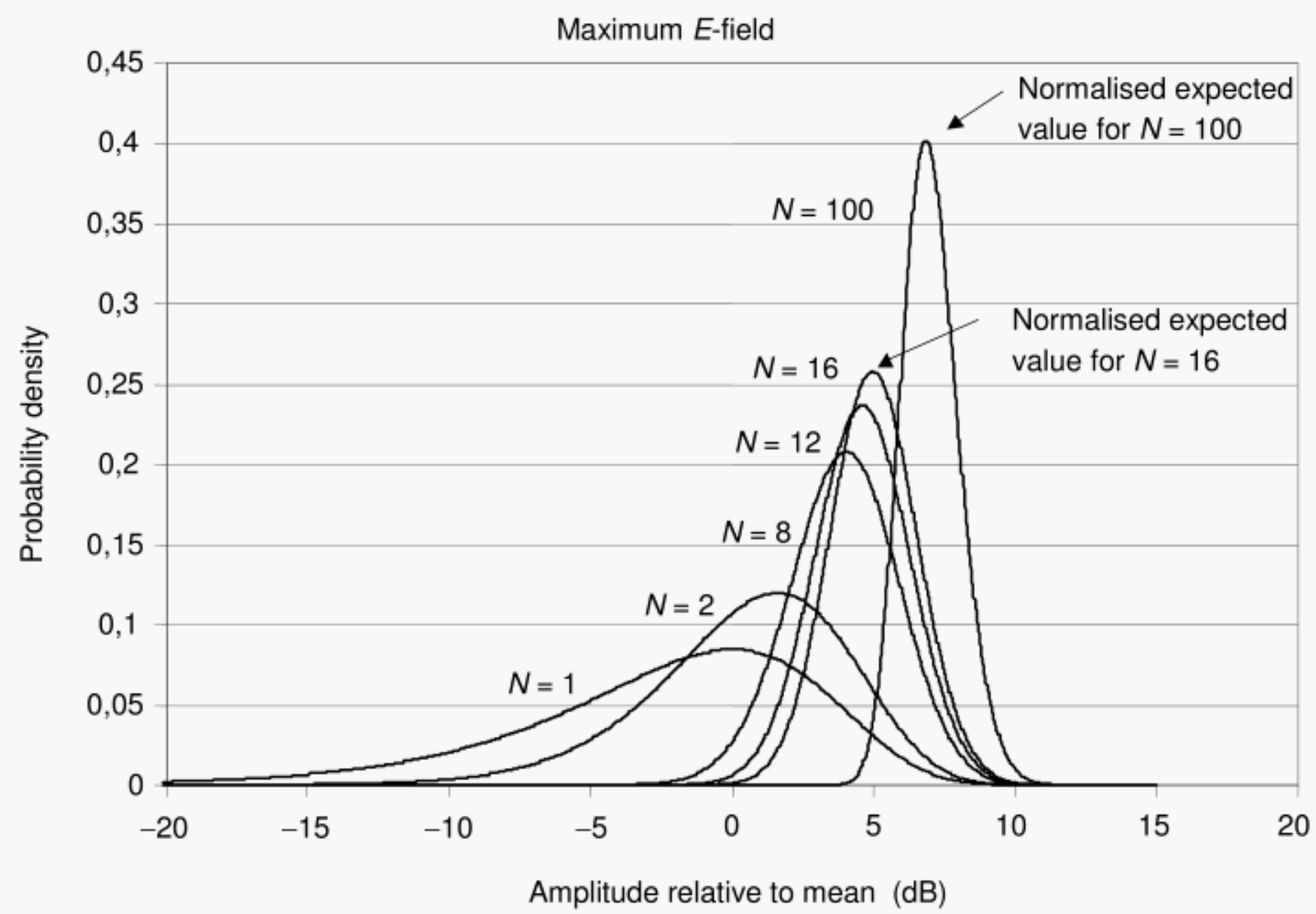


Figure A.8 – Normalised PDF of the mean of an electric field component at one fixed location for a measurement with  $N$  independent samples





**Figure A.9 – Normalised PDF of the maximum of an electric field component at a fixed location for a measurement with  $N$  independent samples**



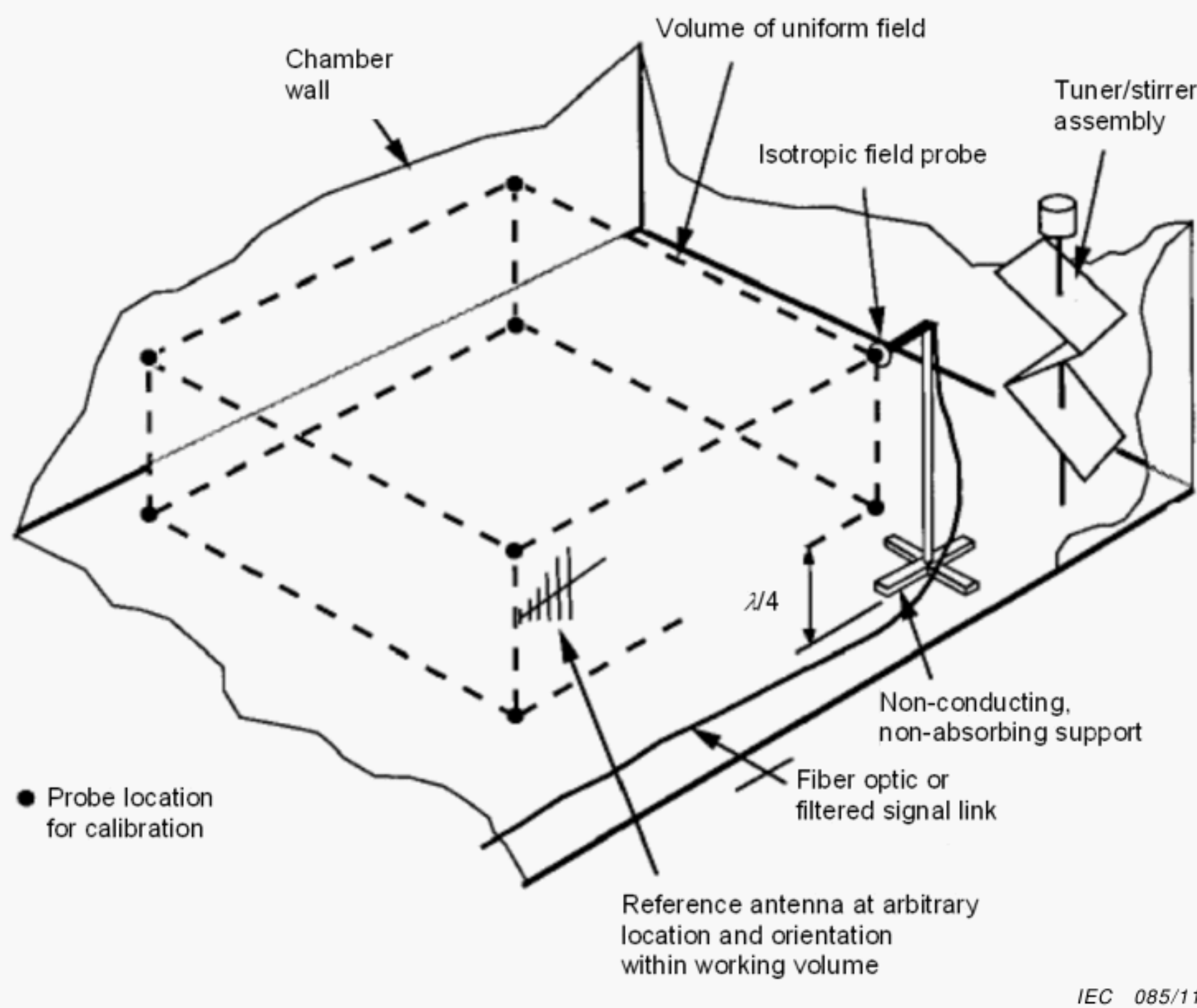


Figure A.10 – Chamber working volume

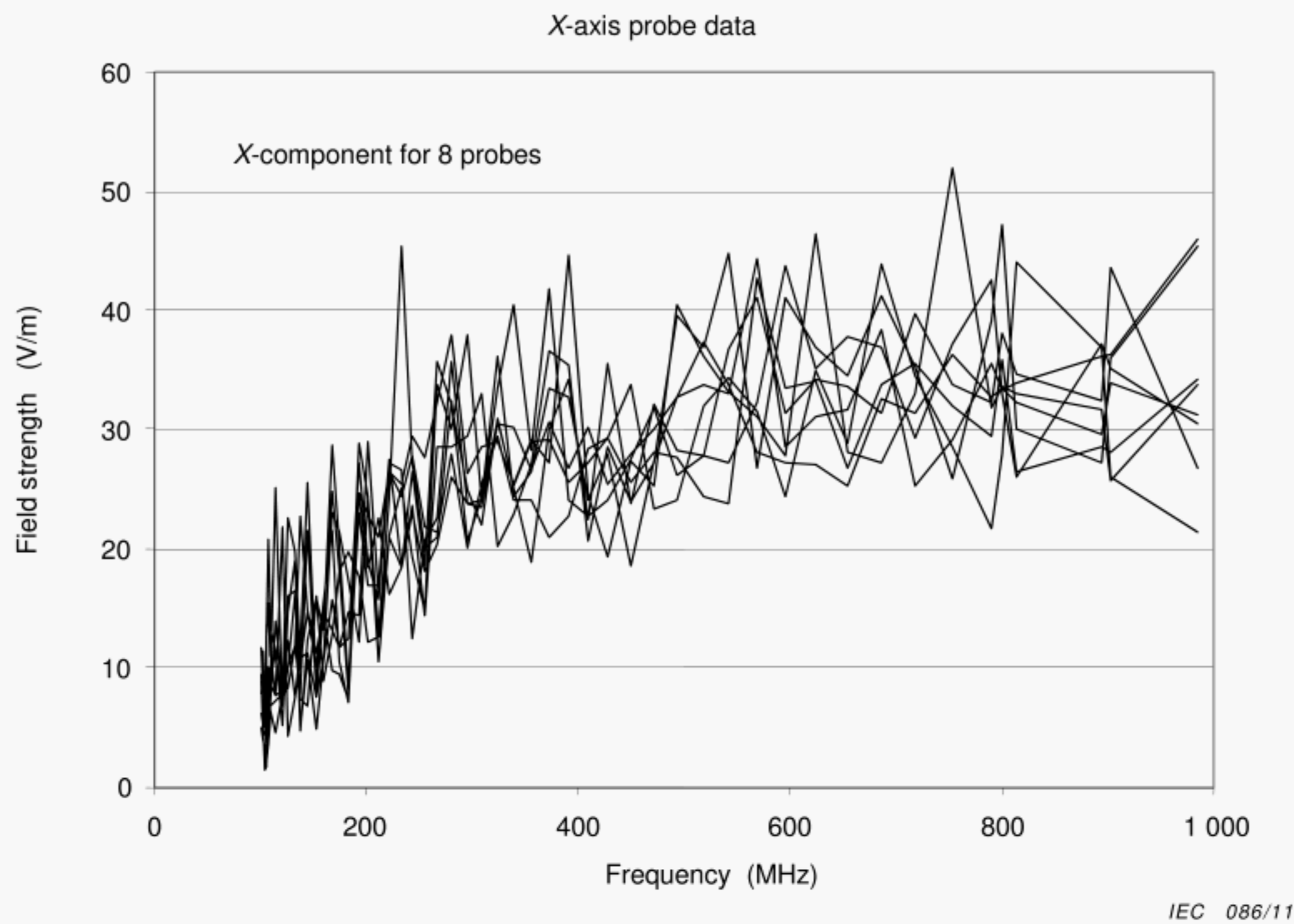
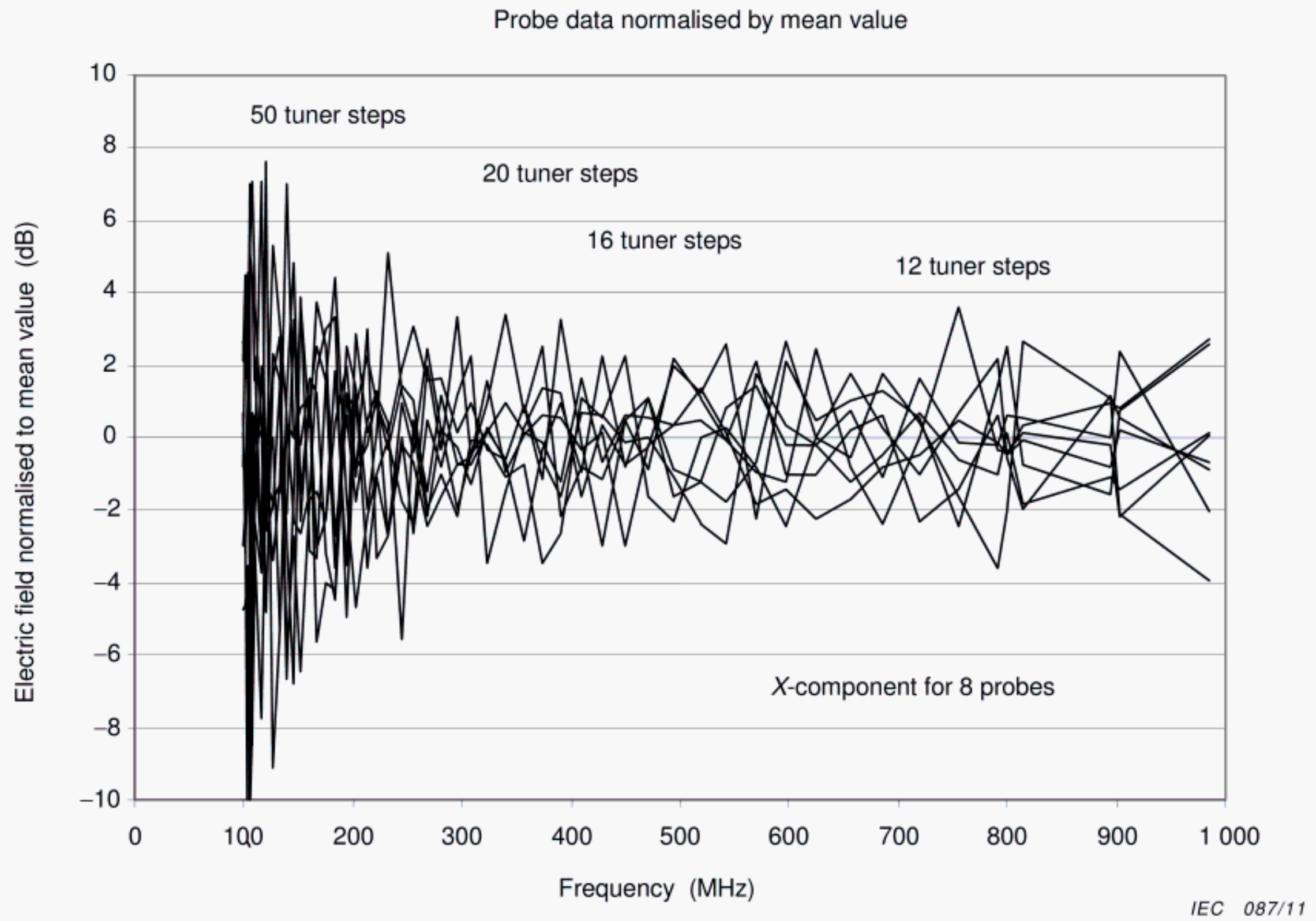
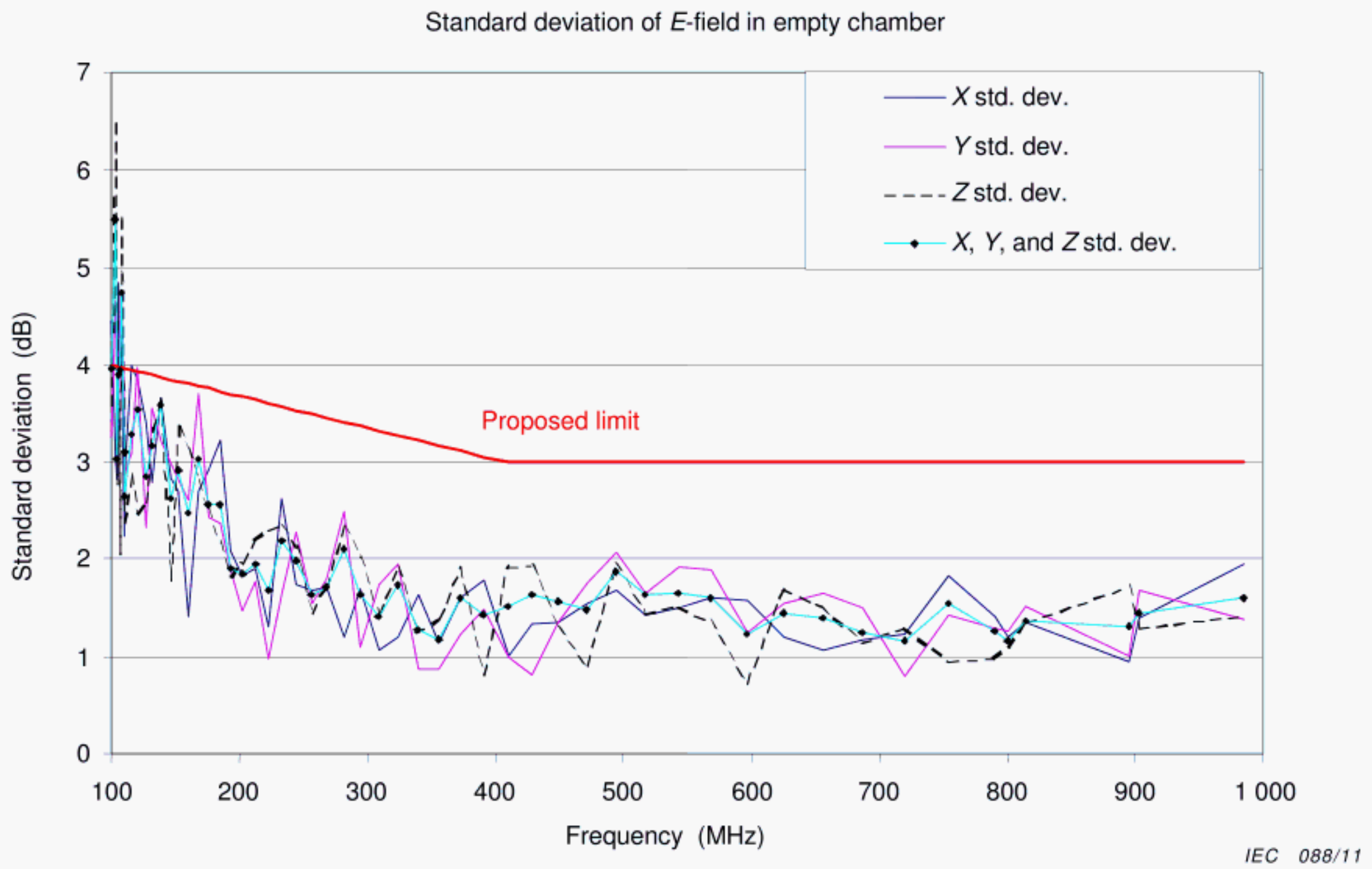


Figure A.11 – Typical probe data





**Figure A.12 – Mean-normalized data for x-component of 8 probes**



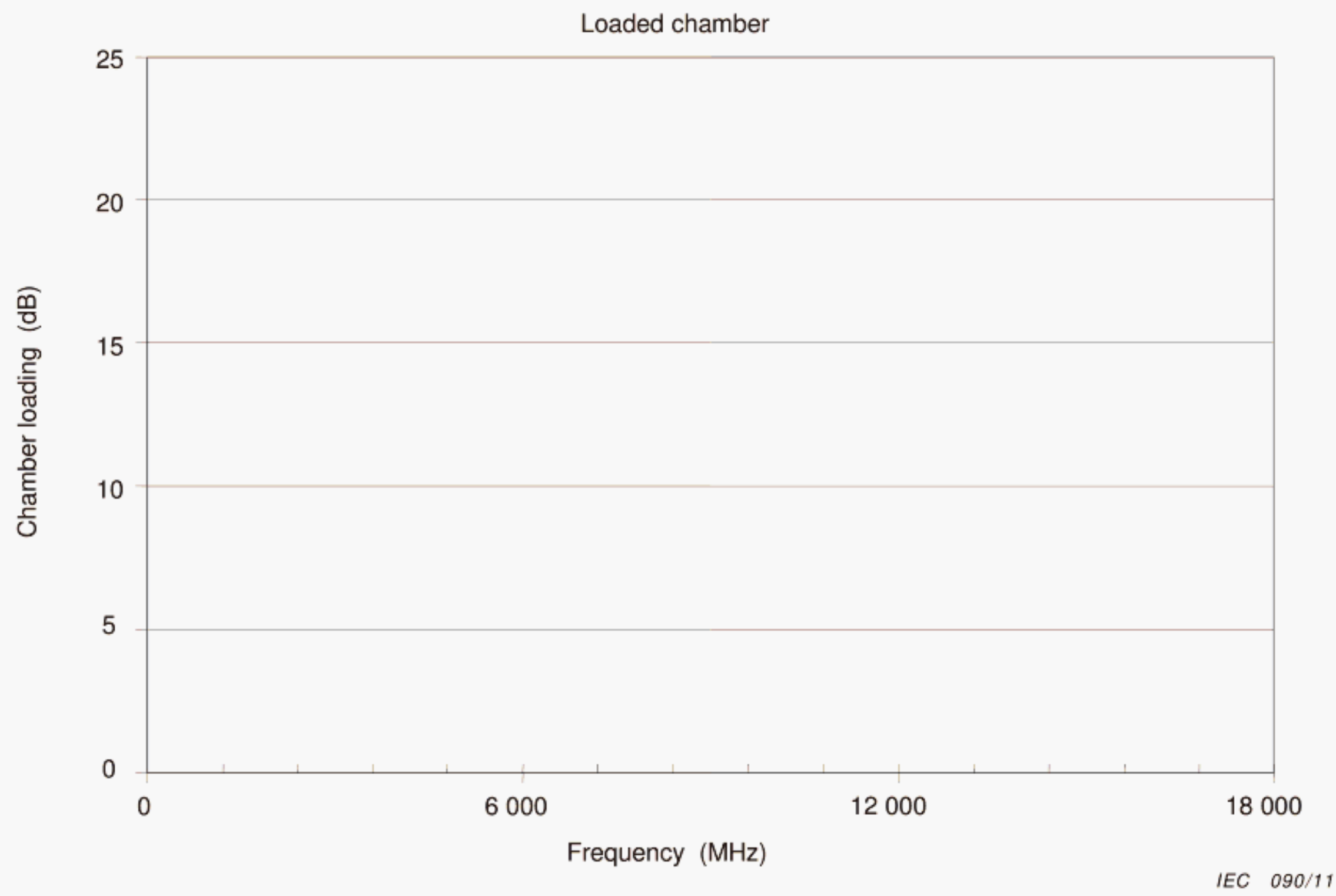
**Figure A.13 – Standard deviation of data for *E*-field components of 8 probes**





IEC 089/11

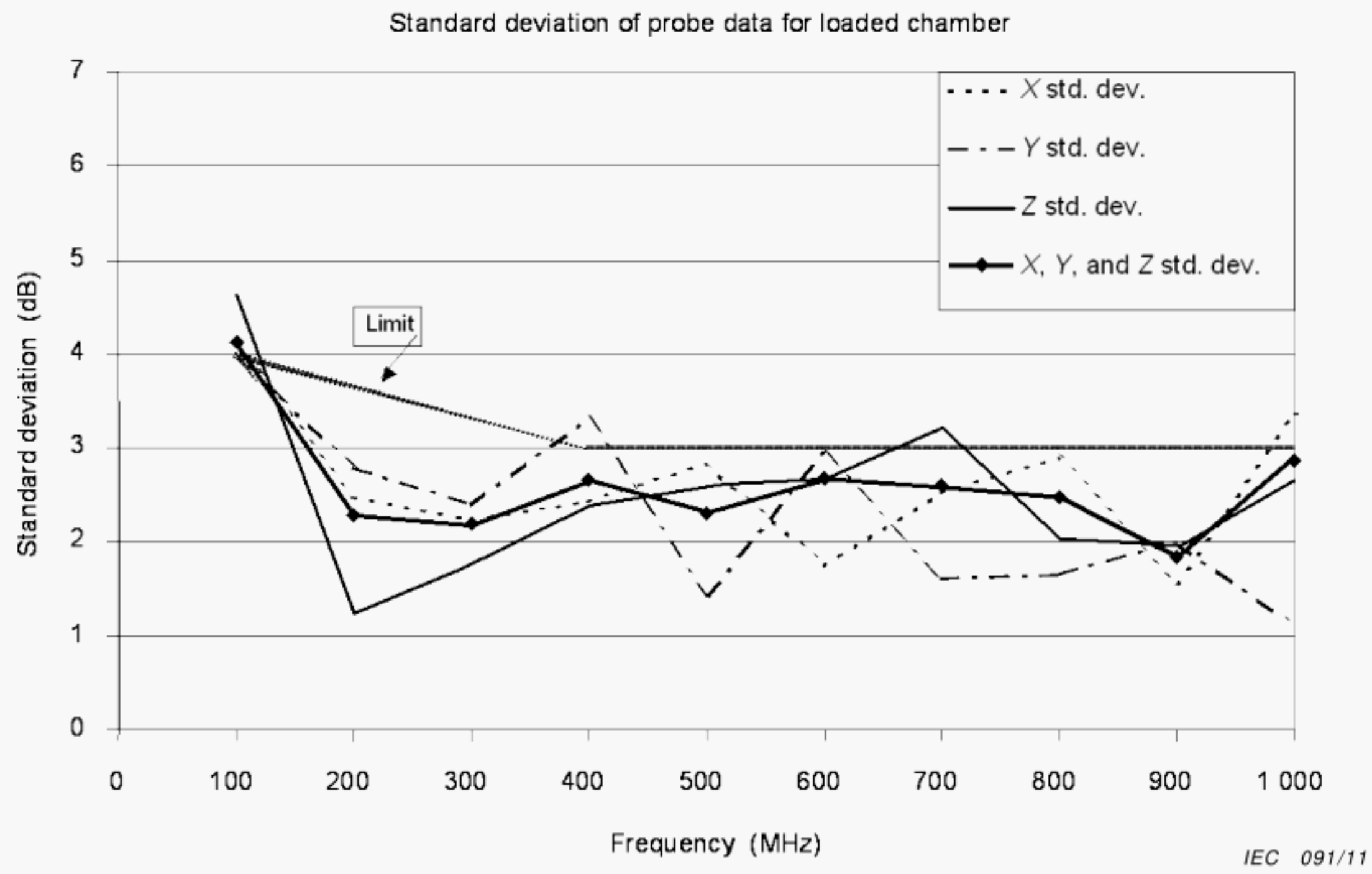
Figure A.14 – Distribution of absorbers for loading effects test



IEC 090/11

Figure A.15 – Magnitude of loading from loading effects test





**Figure A.16 – Standard deviation data of electric field components for eight probes in the loaded chamber**



## Annex B (normative)

### Chamber validation for mode-tuned operation

#### B.1 Validation: chamber field uniformity and loading validation

##### B.1.1 General

As an initial guide to chamber performance and input power requirements, perform a “one-time” empty chamber validation (no EUT) using the procedures of this clause. Prior to each test a validation shall be performed using the procedures of Clause B.2.

The chamber field uniformity shall be verified over the first decade of the operational frequency range. A chamber can be used to perform tests at and above the frequency at which the chamber meets the field uniformity requirements in Table B.2.

##### B.1.2 Field uniformity validation

The following steps are necessary.

- (1) Clear the working volume (i.e., remove test bench and any other artefacts, whether or not they load the chamber) and place the receiving antenna at a location within the working volume of the chamber as outlined in the notes of Figure B.1. Set the amplitude measurement instrument to monitor the receive antenna on the correct frequency.
- (2) Place the *E*-field probe at a location on the perimeter of the chamber working volume as shown in Figure B.1.
- (3) Starting at the lowest test frequency ( $f_s$ ), adjust the RF source to inject an appropriate input power into the transmitting antenna to get a reliable probe reading. The transmitting antenna shall not directly illuminate the working volume or the receiving antenna and probes. Directing the transmitting antenna into one corner of the chamber is often an optimum configuration. The frequency shall be in-band for both transmitting and receiving antennas, which shall be linearly polarized antennas. Care shall be taken to ensure that the harmonics of the RF input to the chamber are at least 15 dB below the fundamental.

NOTE 1 For normal operation the lowest test frequency ( $f_s$ ) is typically of the order of 80 MHz, and field uniformity is demonstrated over the first decade of operation. If a lowest test frequency other than 80 MHz is chosen, for example in a small chamber used to generate high field strengths, then the chamber field uniformity is still verified over the first decade of operation. The start frequency for acceptable measurements is never lower than the frequency at which the chamber meets the field uniformity requirements in Table B.2.

- (4) Step the tuner(s) through 360° in equally sized discrete steps (mode-tuned operation) so that the amplitude measurement instrument and *E*-field probe captures the minimum number of samples as outlined in Table B.1 over one complete tuner rotation. Care shall be taken to ensure that the dwell time is sufficiently long in such a manner that the amplitude measurement instrumentation and *E*-field probes have time to respond properly.
- (5) Record the maximum and average power (linear average: i.e., in W, not dBm) of the receive signal ( $P_{\text{MaxRec}}$ ,  $P_{\text{AveRec}}$ ), the maximum field strength ( $E_{\text{Max } x,y,z}$ ) for each axis of the *E*-field probe, and the average value of the input power ( $P_{\text{Input}}$ ) over the tuner rotation.

NOTE 2 The value of the input power,  $P_{\text{Input}}$ , is the forward power averaged over the tuner rotation. The number of samples used to determine the average should be at least the same as the number of samples used for chamber validation. Large variations in input power (i.e., 3 dB or more) are an indication of poor source/amplifier performance. All validations are antenna specific. Changing antennas may void validations. All power measurements are relative to the antenna terminals. The antennas are assumed to be high efficiency antennas (i.e., greater than 75 % efficient).



- (6) Repeat the above procedure in log-spaced frequency steps as outlined in Table B.1 until frequency is at least  $10 f_s$ .
- (7) Repeat for each of the eight probe locations shown in Figure B.1 and for eight Rx antenna locations (one of which shall be at the center of the working volume) until  $10 f_s$ .

NOTE 3 Steps (4) and (6) may be interchanged if desired, i.e., step through the frequencies at each step of the tuner.

NOTE 4 If the room and mode tuner have strong geometrical symmetry, and if the mode tuner is located symmetrically with respect to all chamber walls, then the set of probe locations should not be chosen so as to exhibit cylindrical symmetry. The symmetry is most easily removed by placing the probes at different locations from their nearest wall.

- (8) Above  $10 f_s$  only three probe and Rx antenna locations need to be evaluated. The probe and antenna should maintain the required clearance from each other and from chamber fixtures. One location for the probe and antenna shall be at the centre of the working volume. Repeat Steps (4) and (5) for the remainder of the validation frequencies, as outlined in Table B.1.

NOTE 5 The Rx antenna should be moved to a new location within the working volume of the chamber for each change in probe location. The antenna should also be placed in a new orientation relative to the chamber axis at each location (at least  $20^\circ$  in each axis). For reference purposes,  $x$  = chamber length (longest dimension),  $y$  = chamber width, and  $z$  = chamber height. The probe does not necessarily need to be oriented along the chamber axes during validation.

Care should be taken to ensure that a proper separation distance between the antenna and probe is maintained. Each location of the antenna or probe should be at least  $\lambda/4$  (or 1 m at the lowest test frequency, if  $\lambda/4 > 1$  m) from any previous location. The same minimum separation should be observed between the antenna and the probe. If the Rx antenna is mounted in a fixed position during routine testing, it is suggested that one of the locations should be the intended location of the receive antenna during measurement or testing.

- (9) Using the data from Step (5), normalize each of the maximum  $E$ -field probe measurements (i.e., each of the  $8 \times 3 = 24$  rectangular components below  $10 f_s$  and  $3 \times 3 = 9$  rectangular components above  $10 f_s$ ) to the square-root of the average input power:

$$\vec{E}_{x,y,z} = \frac{E_{\text{Max } x,y,z}}{\sqrt{P_{\text{Input}}}} \quad (\text{B.1})$$

where

$E_{\text{Max } x,y,z}$  is the maximum measurement (in V/m) from each probe axis (i.e., 24 or 9 measurements) across all generated tuner positions,

$\vec{E}_{x,y,z}$  is the normalized maximum field (in (V/m)/W<sup>0.5</sup>), defined as the maximum measurement from each probe axis data divided by the square root of the input power, and

$P_{\text{Input}}$  is the average input power (in W) to the chamber during the tuner rotation at which  $E_{\text{Max } x,y,z}$  was recorded.

- (10) For each validation frequency, calculate the average of the normalized maximum values across the probe positions for each probe axis of the  $E$ -field probe measurements,  $\langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle$ , as follows.

- (a) For each frequency below  $10 f_s$  calculate

$$\langle \vec{E}_x \rangle_8 = \frac{(\sum \vec{E}_x)}{8}, \quad \langle \vec{E}_y \rangle_8 = \frac{(\sum \vec{E}_y)}{8}, \quad \langle \vec{E}_z \rangle_8 = \frac{(\sum \vec{E}_z)}{8} \quad (\text{B.2})$$

- (b) For each frequency below  $10 f_s$  calculate the average of the normalized maximum of all the  $E$ -field probe measurements giving equal weight to each axis (i.e., each rectangular component),  $\langle \vec{E} \rangle_{24}$ . This is done by calculating the sum of all 24 rectangular (normalized)  $E$ -field maximum values divided the product of the number of probe axes with the number of probe locations, i.e.,  $3 \times 8 = 24$ :



$$\langle \vec{E} \rangle_{24} = \frac{\sum \vec{E}_{x,y,z}}{24} \quad (\text{B.3})$$

NOTE 6  $\langle \rangle$  denotes arithmetic mean across a number of probe positions and/or probe axes.

- (c) For each frequency above  $10 f_s$ , calculate the average of the normalized maximum values across all three probe positions giving equal weight to each axis (i.e., each rectangular component). This results in the same calculation as in (b) upon replacing 24 with 9.
- (11) For each frequency below  $10 f_s$ , determine if the chamber meets the field uniformity requirements as follows:
- (a) The field uniformity is specified as a standard deviation from the normalized mean value of the normalized maximum values obtained at each of the eight locations during one rotation of the tuner. The standard deviation is calculated using data from each probe axis independently and the total data set.

The standard deviation is given by:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\vec{E}_i - \langle \vec{E} \rangle)^2}{n-1}} \quad (\text{B.4})$$

where

$n$  is the number of measurements  $i$ ,

$\vec{E}_i$  is the individual  $E$ -field measurement normalized (to the square root of the input power), and

$\langle \vec{E} \rangle$  is the arithmetic mean of the normalized maximum  $E$ -field measurements.

For example, for the x-vector:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\vec{E}_{x,i} - \langle \vec{E}_x \rangle_8)^2}{8-1}} \quad (\text{B.5})$$

where

$\vec{E}_{x,i}$  is the individual measurement of x-vector,

$\langle \vec{E}_x \rangle_8$  is the arithmetic mean of normalized  $E_{\text{Max } x}$  vectors for all eight measurement locations.

and for all vectors:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^3 \left( \vec{E}_{m,n} - \langle \vec{E} \rangle_{24} \right)^2}{24-1}} \quad (\text{B.6})$$

where

$\vec{E}_{m,n}$  is the individual measurements of all vectors ( $m$  = probe locations 1 through 8 and  $n$  = isotropic probe axis 1 through 3, i.e.,  $x$ ,  $y$ , and  $z$ ),

$\langle \vec{E} \rangle_{24}$  is the arithmetic mean of the normalized vectors  $E_{\text{Max } x,y,z}$  vectors from all 24 measurements, and



$\sigma$  is the standard deviation of all vectors (x, y, and z).

Finally, the standard deviation is expressed relative to the mean and converted to dB:

$$\sigma(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma + \langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle}{\langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle} \right) \quad (\text{B.7})$$

- (b) The chamber passes the field uniformity requirements if the standard deviation for both the individual field components and the total data set is within tolerance as outlined in Table B.2. If the chamber fails to meet the uniformity requirement, it may not be possible for the chamber to operate at the desired lower frequency. If the margin by which the chamber fails to meet the uniformity requirement is small, it may be possible to obtain the desired uniformity by:
- 1) increasing the number of samples (i.e., tuner steps) by 10 % to 50 %,
  - 2) normalizing the data to the average net chamber input power ( $P_{\text{Net}} = P_{\text{Input}} - P_{\text{Reflected}}$ ), or
  - 3) reducing the size of the working volume.

If the chamber exceeds the required field uniformity, the number of samples required may be reduced, but not below a minimum of 12 tuner steps. This offers the ability to optimize each chamber for the minimum number of samples and therefore minimum test time.

NOTE 7 If the tuner fails to provide the required uniformity then the uniformity may be improved by increasing the number of tuners, making the tuner(s) larger, or lowering the  $Q$  by adding absorber. The chamber characteristics (size, construction method, and wall materials) should also be evaluated to determine if the chamber is likely to pass the requirement. Chambers with no more than 60 to 100 modes at the lowest test frequency or very high  $Q$  (such as those encountered in welded aluminium chambers) are likely to encounter difficulty in meeting the required uniformity at low frequencies.

**IMPORTANT:** Once a chamber has been modified (e.g., absorber added, etc.) or the validation procedure has been modified (e.g., changed number of tuner steps, etc.) to obtain a desired characteristic, that configuration and/or procedure shall remain the same for the duration of the test for that validation to remain valid.

### B.1.3 Receive antenna validation

The receive antenna validation factor ( $AVF$ ) for an empty chamber is determined to provide a baseline for comparison with a loaded chamber (Clause B.2).

Calculate  $AVF$  for each frequency using the following equation:

$$AVF = \left\langle \frac{P_{\text{AveRec}}}{P_{\text{Input}}} \right\rangle_{8 \text{ at } \leq 10 f_0 \text{ or } 3 \text{ at } > 10 f_0} \quad (\text{B.8})$$

where  $P_{\text{Input}}$  is the average input power obtained from B.1.2 (5) for the corresponding location at which the average received power ( $P_{\text{AveRec}}$ ) from B.1.2 (5) was measured. The  $AVF$  is necessary to correct the antenna measurements for several effects including antenna efficiency.

NOTE  $\langle \rangle$  denotes arithmetic mean, i.e.,  $\langle P_{\text{AveRec}} \rangle_8 = (\sum P_{\text{AveRec}})/8$  evaluated at 8 probe locations if the frequency is below  $10 f_s$ , or at 3 locations if the frequency is in excess of  $10 f_s$ .

### B.1.4 Chamber insertion loss

The chamber insertion loss ( $IL$ ) for the empty chamber is determined to provide information for calculations required by other annexes.



Calculate  $IL$  for each frequency using the following equation:

$$IL = \left\langle \frac{P_{\text{MaxRec}}}{P_{\text{Input}}} \right\rangle_{8\text{at} \leq 10 f_0 \text{ or } 3\text{at} > 10 f_0} \quad (\text{B.9})$$

where  $P_{\text{Input}}$  is the average input power from B.1.2 (5) for the corresponding location at which the maximum received power ( $P_{\text{MaxRec}}$ ) from B.1.2 (5) was measured.

NOTE  $\langle \rangle$  denotes arithmetic mean, i.e.,  $\langle P_{\text{MaxRec}} \rangle_8 = (\sum P_{\text{MaxRec}})/8$  evaluated at 8 probe locations if the frequency is below  $10 f_s$ , or at 3 locations if the frequency is in excess of  $10 f_s$ .

### B.1.5 Chamber E-field estimation using antennas

The empty chamber validation outlined in B.1.2 is based on readings from  $E$ -field probes. The chamber  $E$ -field can be estimated based on measurements using antennas. This alternative procedure is contained in Annex A.

NOTE Significant disagreement at the lower frequencies is expected. This is due to loading caused by the Tx and Rx antennas. For this reason, the agreement between the two methods is not expected at frequencies where the difference between the chamber input power and the measured maximum receive power from the reference antenna is 10 dB or less.

### B.1.6 Verification of maximum chamber loading

In order to determine if the chamber is adversely affected by an EUT which “loads” the chamber, perform a one-time check of the chamber field uniformity under simulated loading conditions. It is suggested the “loaded” chamber validation be carried out only once in the life of the chamber or after major modification to the chamber. Prior to each test a validation shall be performed using the procedures of Clause B.2.

- (1) At random locations within the working volume of the chamber, install a sufficient amount of absorber to load the chamber to at least the level expected during normal testing (a factor of 16 change in  $AVF$  (12 dB) should be considered as a nominal amount of loading).

NOTE Each chamber is unique. The easiest way to determine the amount of absorber necessary is by trial and error.

- (2) Repeat the validation outlined in B.1.2 using the eight locations of the  $E$ -field probe. Care should be taken to ensure that the  $E$ -field probe and receiving antenna maintain a distance of greater than  $\lambda/4$  from any absorber. Determine the chamber loading by comparing the antenna validation factor ( $AVF$ ) from the empty chamber to that obtained from the “loaded” chamber (B.1.3)

$$\text{Loading} = \frac{AVF_{\text{Empty Chamber}}}{AVF_{\text{Loaded Chamber}}} \quad (\text{B.10})$$

- (3) Repeat the calculation of the field uniformity using the data from the eight locations of the  $E$ -field probe.

If the chamber loading results in the rectangular component of the fields exceeding the allowed standard deviation, or if the standard deviation for all vectors (i.e.,  $\sigma_{24}$ ) exceeds the allowed standard deviation (see Table B.2) then the chamber has been loaded to the point where field uniformity is unacceptable. In this case the amount of chamber loading shall be reduced and the loading effects evaluation shall be repeated.

## B.2 Validation: verification of chamber performance with EUT in place

Prior to each test, with the EUT and supporting equipment in the chamber, perform a chamber validation according to the following procedure.

- (1) Place the receive antenna at a location within the working volume of the chamber and maintain 1 m (or  $\lambda/4$  at the lowest test frequency) separation from the EUT, supporting



equipment, etc., as outlined in this annex for the type of test being performed. Set the amplitude measurement instrumentation to monitor the receive antenna on the correct frequency.

- (2) Beginning at the lowest test frequency ( $f_s$ ), adjust the RF source level to inject an appropriate input power, ( $P_{\text{Input}}$ ), into the transmit antenna. Care shall be taken to ensure that the harmonics of the RF input to the chamber are at least 15 dB below the fundamental.
- (3) Operate the chamber and the tuner taking into account the possible additional features defined in B.1 that have been required to meet the homogeneity criterion. Care shall be taken to ensure that the dwell time is sufficiently long to ensure that the amplitude measurement equipment has time to respond properly.
- (4) Record the maximum amplitude and average amplitude of the receive signal ( $P_{\text{MaxRec}}$ ,  $P_{\text{AveRec}}$ ), and the average value of the input power,  $P_{\text{Input}}$ . The measurement instruments should have a noise floor at least 20 dB below the maximum received power ( $P_{\text{MaxRec}}$ ) in order to collect accurate average data.
- (5) Repeat the above procedure for each test frequency as defined in the test plan.
- (6) Calculate the chamber validation factor ( $CVF$ ) for each frequency using the following equation:

$$CVF = \left\langle \frac{P_{\text{AveRec}}}{P_{\text{Input}}} \right\rangle_n \quad (\text{B.11})$$

where

$CVF$  is the normalized average received power over one tuner rotation with the EUT and supporting equipment present,

$P_{\text{AveRec}}$  is the average received power over one tuner rotation from Step (4),

$P_{\text{Input}}$  is the forward power averaged over one tuner rotation from Step (4), and

$n$  is the number of antenna locations the  $CVF$  is evaluated for. Only one location is required; however, multiple locations may be evaluated and the data averaged over the number of locations.

- (7) Calculate the chamber loading factor ( $CLF$ ) for each frequency using the following equation:

$$CLF = \frac{CVF}{AVF} \quad (\text{B.12})$$

where

$CVF$  is the ratio of the average received power to input power obtained in Step (6) above, and

$AVF$  is the ratio of the average received power to input power obtained in the antenna validation in B.1.2. Interpolation will be required to obtain the  $AVF$ .

If the reciprocal value of the magnitude of the chamber loading factor is in excess of the loading that is measured in B.1.2 (5) by more than is expected due to instrument uncertainty, there is a possibility that the chamber may be loaded to the point where field uniformity is affected. In such a case, the chamber uniformity measurements outlined in B.1.2 shall be repeated with the EUT in place or with a simulated loading equivalent to the EUT.

**NOTE** If the value of  $P_{\text{AveRec}}$  measured in Clause B.2 (5) is within (i.e., neither greater nor less than) the values recorded for all eight locations in B.1.2 (5), calculation of the  $CLF$  is not necessary and the value of the  $CLF$  should be assumed to be 1. If the dynamic range of the measurement system was insufficient to get accurate average received power measurements, the  $AVF$  and  $CVF$  may be recalculated using maximum received power and then used to calculate the  $CLF$ . If maximum received power is used, it should be used to recalculate both the  $AVF$  and  $CVF$ .

**CAUTION:** This applies ONLY to the calculation of the  $CLF$ . Do NOT use the  $AVF$  or  $CVF$  based on maximum power to determine any other parameters!



### B.3 Q and time constant validation

In order to assure that the time response of the chamber is fast enough to accommodate pulsed waveform testing, determination of the chamber time constant shall be accomplished using the following procedure:

- (1) Using the *CVF* from the chamber validation Equation (B.11), calculate the quality factor, *Q* for every frequency using:

$$Q = \left( \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \right) (CVF) \quad (B.13)$$

where

- $\eta_{Tx}$ ,  $\eta_{Rx}$  are the antenna efficiency factors for the transmit and receive antennas, respectively, which can conservatively be assumed (if not known) to be 0,75 for a log periodic antenna and 0,9 for a horn antenna,
- V* is the chamber volume (in m<sup>3</sup>),
- $\lambda$  is the free space wavelength (in m) at the specific frequency, and
- CVF* is the chamber validation factor.

NOTE If the value of  $P_{AveRec}$  measured in Clause B.2 (4) is within (i.e., not greater than or less than) the values recorded for all eight locations in B.1.2 (5), calculation of the *CLF* is not necessary and the value of the *CLF* is assumed to be 1. In this case, the *AVF* from B.1.2 should be used in place of the *CVF* when calculating the chamber *Q*.

- (2) Calculate the chamber time constant  $\tau$  (in s) for every frequency using:

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f} \quad (B.14)$$

where

- Q* is the value calculated in Step (1) above, and
- f* is the test frequency (in Hz).

- (3) If the chamber time constant is greater than 0,4 of the modulation test pulse width for more than 10 % of the test frequencies, absorber shall be added to the chamber or the pulse width increased. If absorber is added, repeat the *Q* measurement and the calculation until the time constant requirement is satisfied with the least possible absorber. A new *CLF* shall be defined if absorber material is required.



**Table B.1 – Sampling requirements**

Frequency range	Minimum number of samples <sup>a</sup> required for validation and test <sup>d</sup>	Number of frequencies <sup>b</sup> required for validation
$f_s$ to $3 f_s$ <sup>c</sup>	12	20
$3 f_s$ to $6 f_s$	12	15
$6 f_s$ to $10 f_s$	12	10
Above $10 f_s$	12	20/decade

<sup>a</sup> The minimum number of tuner steps is 12 for all frequencies. For many chambers the number of tuner steps will need to be increased at the lower frequencies. The maximum number of tuner steps is the number of independent samples that a given tuner can produce. This number varies with frequency and needs to be verified when commissioning the chamber. In the event that the chamber fails to meet the uniformity requirement, the number of tuner steps may be increased up to the number of independent tuner samples. An example of increased numbers of tuner steps in this case is shown in Figure A.12.

<sup>b</sup> Log spaced.

<sup>c</sup>  $f_s$  = Start frequency (see A.1.3 for LUF)

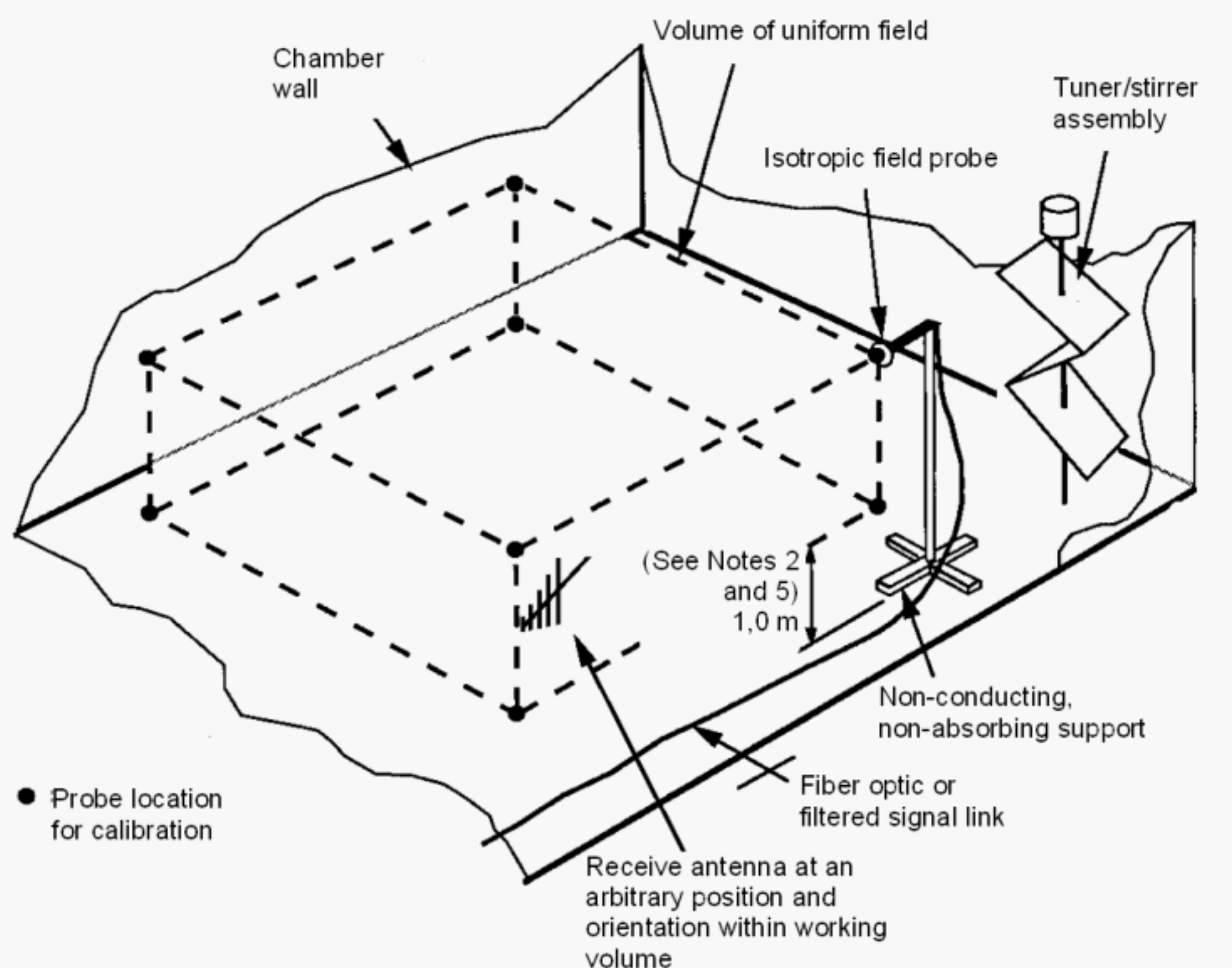
<sup>d</sup> The tuner sequencing used for validation of the chamber shall be the same as for subsequent testing.

**Table B.2 – Field uniformity tolerance requirements**

Frequency range MHz	Tolerance requirements for standard deviation
80 to 100	4 dB <sup>a</sup>
100 to 400	4 dB at 100 MHz decreasing linearly to 3 dB at 400 MHz <sup>a</sup>
Above 400	3 dB <sup>a</sup>

<sup>a</sup> A maximum of three frequencies per octave may exceed the allowed standard deviation by an amount not to exceed 1 dB of the required tolerance.





IEC 092/11

NOTE 1 Validation of the fields inside the reverberation chamber should consist of eight probe locations.

NOTE 2 The locations enclose a volume known as the “working volume” of the chamber. It is recommended that the surfaces bounding the working volume be not closer than 1 m (see Note 5) from any chamber surface, field generating antenna or tuner assembly. For validation and monitoring purposes the receive antenna may be located at any location within the working volume. The transmitting antenna should be directed into a corner of the chamber if possible. Directing the antenna toward the tuner is also acceptable. The location of the transmitting antenna should remain fixed during validation and testing. The location of the transmit antenna should be the same for both validation and testing.

NOTE 3 The working volume may be sized to suit the maximum working volume of the chamber or sized to suit the items to be tested. It is recommended that the working volume be sized to suit the maximum working volume; otherwise, a new validation will be required if larger items are to be tested. The working volume need not be rectangular in shape. For arbitrary shapes it may be necessary to add validation points in order to properly define the working volume.

NOTE 4 An isotropic probe with access to each of the three axes should be used to perform validations. A calibrated electrically short dipole antenna (i.e., less than  $\lambda/3$  long) may be substituted, provided that the dipole antenna is positioned at three mutually perpendicular orientations for each measurement location. Care should be taken to ensure that the dipole is not influenced by its connecting cable. An optically isolated measurement system (isotropic probe or dipole) is recommended.

NOTE 5 The minimum separation distance may be reduced provided that the separation is greater than  $\lambda/4$  for the lowest test frequency. Separation distances of less than  $\lambda/4$  are not recommended in any case.

**Figure B.1 – Probe locations for chamber validation**



## **Annex C** (normative)

### **Chamber validation and testing for mode-stirred operation**

#### **C.1 Mode-stirred chamber validation**

##### **C.1.1 General**

This annex relates to the mode-stirred (continuous uniform rotation) method of operation as opposed to the mode-tuned (discrete stepwise rotation) validation detailed in Annex B. In mode-stirring operation, care shall be taken to ensure that the stirrer speed is such that the chamber, sensors, and equipment under test (EUT) are capable of responding adequately to the continuously changing field, in order to avoid unacceptable effects (including averaging).

For a fixed tuner rotation speed, the rate of change of the field changes with excitation frequency. This implies that either the tuner shall be changed to account for the field variations at the highest test frequency, or the rotation rate shall be chosen in function of the excitation frequency.

The tuner or paddle wheel shall be driven with either a stepper motor (as in mode tuning) or a continuous motor driver, provided the motor speed can be controlled to accommodate the testing of an EUT with various response or cycle times. Provided the EUT is exposed adequately to the continuously changing field, mode stirring is potentially faster than the mode tuning. In fact, if the EUT response/cycle time is short relative to the rate of change of the field, the mode-stirred technique can be more thorough because all intermediate stirrer states are also covered while avoiding effects caused by field transients that are generated during the start, stop, and acceleration phases inherent to mode-tuned operation.

Since a mode stirrer rotates continuously, the chamber field shall be sampled across a time interval whose length and sampling rate are chosen judiciously. Too short an interval may not enable the probe or receiver to respond sufficiently rapidly to capture the instantaneous chamber field or it may cause side effects due to windowing. On the other hand, too long an interval causes uniform or weighted time averaging of field values, so that large deviations from the average value may remain undetected. Too slow sampling may give rise to ambiguity in the measured stirrer sweep data. The data acquisition system for mode stirred operation shall be able to process data at a sufficiently high rate and in a sufficiently large number, which limits the maximum sampling rate and stirring speed.

The procedure for chamber validation outlined in Annex B can be used to validate a chamber for performing mode-stirred tests. The tuner/stirrer is now rotated in a uniform and continuous manner, and the field is sampled by the probes or sensors over one rotation or part thereof. The main difference is the use of 3-axis sensors during the 8-point volume validation of the chamber. As a minimum, the mode-tuned validation technique as detailed in Annex B can be employed to provide both uniformity data for the chamber and *E*-field chamber validation data.

##### **C.1.2 Field probe considerations for use in mode-stirred operation**

The majority of commercially available 3-axis *E*-field probes (calibrated in free space) do not have an adequate sample rate to permit their use during continuous mode-stirred chamber validation. If these probes are used, the speed of the tuner shall be sufficiently slow to enable the calibrated sensors to respond adequately to the changing field. Other rapidly responding calibrated sensors are available. Although these sensors are very often single-axis, they can be used provided they are reoriented at 3 orthogonal axes at each of the 8 positions during the volume validation. Regardless of the type of probe used, the number of independent samples (*N*) collected by the probe over one stirrer rotation shall be known.



Two common sampling issues for typical probes are smoothing and peak sampling, leading to apparently lower and higher field strength levels, respectively. Both problems also lead to larger perceived field uniformity [1]<sup>5</sup>. They should be minimised, by using faster sensors and/or slower rotation rates.

If multiple sensors are placed in the chamber simultaneously, they shall have identical sample rates. Otherwise, the devices may not be exposed to the same expected peak field.

By rotating the stirrer at a sufficiently slow speed and provided the chamber is reverberating adequately, the following inequalities shall be satisfied:

$$T_s \ll \tau_{ch} \ll \tau_p \text{ and } T_s \ll \tau_{Rx} \ll \tau_p \quad (C.1)$$

where

- $T_s$  is the period of the CW excitation (in s), typically of the order of ns;  $T_s = 1/f_0$ ,
- $\tau_{ch}$  is the effective (mode-averaged) decay time of the unstirred chamber (in s), typically of the order  $\mu$ s;  $\tau_{ch} = Q(f)/(2\pi f_0)$ ,
- $\tau_p$  is the time constant of the stirring process, which depends on the revolution speed  $\Omega_m$  of the stirrer and the maximum number of independent samples  $N$  that is generated in mode-tuned operation, with the same paddle wheel in the same chamber, and is typically of the order of s;  $\tau_p = 2\pi/(N \Omega_m)$ , and
- $\tau_{Rx}$  is the time constant of the sensor (probe, antenna, receiver), typically of the order of  $\mu$ s to ms.

NOTE 1 The number of independent samples,  $N$ , cannot exceed the corresponding number that a stepped tuner is capable of providing.

NOTE 2 As probe/sensor technology improves, fast 'real time' sensors (single or 3-axis) may or soon will become available to permit performing the 8-point volume calibration by employing continuous mode-stirred techniques. This may require bypassing the default data acquisition by the probe under its own software control (e.g., reducing or removing re-sampling routine of a single data point) in order to achieve a sufficiently dense sampling of the continuous stirrer sweep trace.

NOTE 3 The calibration technique in Annex B can be modified to allow for the use of calibrated sensors (calibrated in free space) to be employed during a mode-stirred volume calibration.

In order for the cavity field to remain in the same steady-state as during mode-tuned operation (ignoring stepping transitions), an upper limit for the permissible stirring rate is given by the order-of-magnitude relation:

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{8f^2 Q \sqrt{N} V} \quad (C.2)$$

where

- $\Omega_m(f)$  is the mechanical stirring rate (in revolutions per second (rps)) at the operating frequency  $f$  (in Hz),
- $c$  is the velocity of light in free space, approximately  $3 \times 10^8$  m/s,
- $Q$  is the chamber quality factor at frequency  $f$ ,
- $N$  is the maximum number of independent samples at frequency  $f$  (see Clause A.3), and
- $V$  is the working volume of the chamber (in m<sup>3</sup>).

For example, for a chamber with  $V = 100$  m<sup>3</sup>,  $f = 1$  GHz,  $Q = 10^4$  and  $N = 1\,000$  requires  $\Omega_m(f) < 0,1$  rps.

<sup>5</sup> Figures in square brackets refer to Clause C.5, Reference documents, at the end of this annex.



## C.2 Mode-stirred immunity testing

Provided the chamber meets the chamber uniformity in terms of standard deviation, the mode-stirred measurement technique can be employed during the equipment test. During the test, only a passive reference antenna and the chamber input power are employed to establish the fields within the chamber. During mode-stirred operation, the number of samples (response intervals of the EUT) may be increased or decreased dramatically, depending on the rotation rate of the stirrer and the response time of the EUT. If the number of samples is increased, then the expected value of the maximum field (radiated or received) will increase and the chamber field uniformity will be improved (see C.3.3 and A.4.4). The parameters that require careful consideration are the ratio of the stir period to the cavity relaxation time and the ratio of the stir period to the response/cycle time of the EUT [2]. If stirring speeds are relatively high, then this changes the fundamental nature and characteristics of the test field due to the fact that nonstationary effects then arise [3, 4].

Often, no prior information is available related to the response time or cycle times of the EUT. Due to this lack of information, the mode-stirred measurement shall be applied only with careful consideration of the minimum response time and the speed of the stirrer.

NOTE 1 The definition of a fast responding EUT, antenna, or probe is one able to provide at least one sample per 1 dB change in the field, within 3 dB of the maximum field. For equipment with slow response/cycle times, where it is necessary to dwell for some pre-defined time at each tuner step, the mode-tuned technique may be faster and more accurate.

NOTE 2 During evaluation of the EUT, the response time of the EUT (known or estimated) should be similar to that of the sensors during calibration, resulting in a similar number of total samples.

Some devices are more sensitive to the average or aggregated field than to the maximum field (e.g., thermal effects) [1]. In cases where the EUT is capable of averaging or integrating the field to which it is being exposed, rapidly turning stirrers may be advantageous. In such cases, the test is no longer to the maximum chamber field but to the average chamber field. The maximum permitted speed of the tuner is not defined within this technique. A minimum stirring speed then defines the uncertainty level of the test field.

Determination of the appropriate tuner rotation rate is essential using the mode-stirred technique. This rate depends on the frequency and chamber  $Q$  [2]. The rotation rate shall allow for sufficient time for the chamber field and measurement instrumentation to track changes of the cavity boundaries, for the EUT to respond adequately, and for any upset to be detected. Often, in non-destructive testing, the EUT shall exhibit a repeatable upset in order to determine if the selected tuner rotation rate is appropriate. Once an upset has occurred the rotation rate can be adjusted, increased or decreased, to determine if any change in the upset threshold occurs. Any significant change in the upset threshold indicates an issue with the original tuner rotation rate. The mode-stirred technique is most appropriate for fast EUTs that have a very short response time.

It is not within the scope of this test procedure to provide precise limits on the stirrer speed and detailed test procedures for ensuring that the tuner speed is adequately slow (or fast) for equipment under test to respond. As a guide, adequate response for an immunity tested EUT requires the stirrer speed to satisfy

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{16 \pi f^3 \tau_{\text{EUT}} \sqrt{N} V} \quad (\text{C.3})$$

where

$\tau_{\text{EUT}}$  is the maximum time constant (response time) (in s) for any critical component within the EUT.

For example, for a chamber with  $V = 100 \text{ m}^3$ ,  $f = 1 \text{ GHz}$ ,  $N = 1\,000$ , and  $\tau_{\text{EUT}} = 1 \text{ } \mu\text{s}$ , this requires  $\Omega_m(f) < 0,16 \text{ rps}$ .



Depending on the scope of the test, the nature of the test quantity (average versus peak values), the length of the time averaging interval, and the particular behaviour of the EUT, deviations from the upper limit in Clause C.3 may be permissible but shall be adequately justified.

If the EUT bandwidth is less than the chamber Q-bandwidth at the test frequency, then [2] applies. In practice, the frequency response and time constant of a EUT are often unknown and difficult to measure or estimate, or there may be several such constants of different orders of magnitude. If the test involves a modulated excitation signal, then the period of the signal shall not exceed the correlation time, which requires

$$\Omega_m < \frac{B}{2\pi N} \quad (\text{C.4})$$

where

$\Omega_m$  is the mechanical stirring rate (in rps) at the center (carrier) frequency  $f$ , and  
 $B$  is either the bandwidth (in Hz) of the excitation  $[f - B/2, f + B/2]$  or  $BW_Q$ , whichever is the larger.

The technique (mode-stirred or mode-tuned) shall be highlighted and agreed within the individual equipment test plan. Justifications for the use of either one of the reverberation chamber techniques (mode-stirred or mode-tuned) shall be recorded within the test report for the equipment being tested.

The product committees have to give detailed information for an adequate tuner speed for performing compliance tests of a specific product. If product committees cannot provide this information compliance, tests shall be performed using the mode-tuned technique.

### C.3 Other stirring considerations

#### C.3.1 Response/cycle time of the equipment under test

The faster the response time and/or cycle time of the EUT, the better suited the EUT is for stirring [3]. This is one reason why mode-stirred methods are preferred for shielding effectiveness (SE) tests. Receivers used for SE testing are generally very fast. For immunity testing, time required for the EUT to respond to the applied field and any upset or anomaly to be detected shall be considered. For emissions testing, the cycle time of the device and the response time of the monitoring equipment shall be considered.

For very high shielding, receivers are often set to a narrower resolution bandwidth to increase the dynamic range of the measurement. This may reduce the response time and sampling rate of the receiver. These changes shall be accounted for during the test.

#### C.3.2 Stirrer rotation rate

The stirrer rotation rate shall be established prior to starting the test. The rate of change of the field will determine the tuner rotation rate. For immunity testing, the rate is determined by the time required for the EUT to respond to the applied field and any upset or anomaly to be detected. For emissions testing, the rate is determined by the cycle time of the device and the response time of the monitoring equipment. Figures C.1 and C.2 show the fields within a reverberation chamber at two frequencies, when a single tuner is rotated at a fixed rate of about 5,2 s per rotation. The rate of change of the field within a reverberation chamber is frequency dependent. At higher frequencies, the rate of change can be very rapid even for a moderate rotation rate, because of a larger number of independent samples being available. The rate of change in the field for a particular chamber shall be evaluated over the frequency range of interest. The rotation rate of the tuner can be set according to the slowest rotation rate that will give the maximum allowed rate of change in the field. The tuner rotation rate can



be further adjusted over the frequency range to be tested. Evaluation of the tuner should be performed at intervals not to exceed 100 MHz at frequencies below 1 GHz and 1 000 MHz at frequencies above 1 GHz.

### C.3.3 Tuner effect on expected E-field

As described in Annex A (see Figure A.10), the expected value of the maximum *E*-field is determined by the number of independent samples (i.e., tuner steps) *N* that can be generated over one rotation. The validation in Annex B uses the number of tuner steps shown to provide uncertainties less than the maximum acceptable value for the chamber. When using mode-stirring, it is likely that a smaller number of samples is obtained than when using mode-tuned validation. If more samples are obtained, then the effect on immunity tests would be to test at a level higher than required. For maximum-power-based measurements, if more samples are obtained during an emission test, then the result would be that a higher level of radiated power would be measured from the EUT than it was actually emitting. For average-power-based measurements, mode stirring would be more accurate due to the increased number of samples. It is desirable that the number of samples obtained during the test be the same as the number of samples obtained during validation. If the number of samples is not the same then it is desirable to have the number of samples for both validation and test to be as large as possible because, at high numbers (i.e., in excess of 100), the variations in the expected *E*-field are then less pronounced.

NOTE As shown in Annex A, the tuner is not capable of delivering an infinite number of samples. The maximum number of samples (*n*) that contribute to the expected value of the *E*-field is limited to the number of independent samples the tuner is capable of providing. This number decreases rapidly as the test frequency approaches the lowest useable frequency of a given chamber.

## C.4 Issues to be addressed when using mode stirring

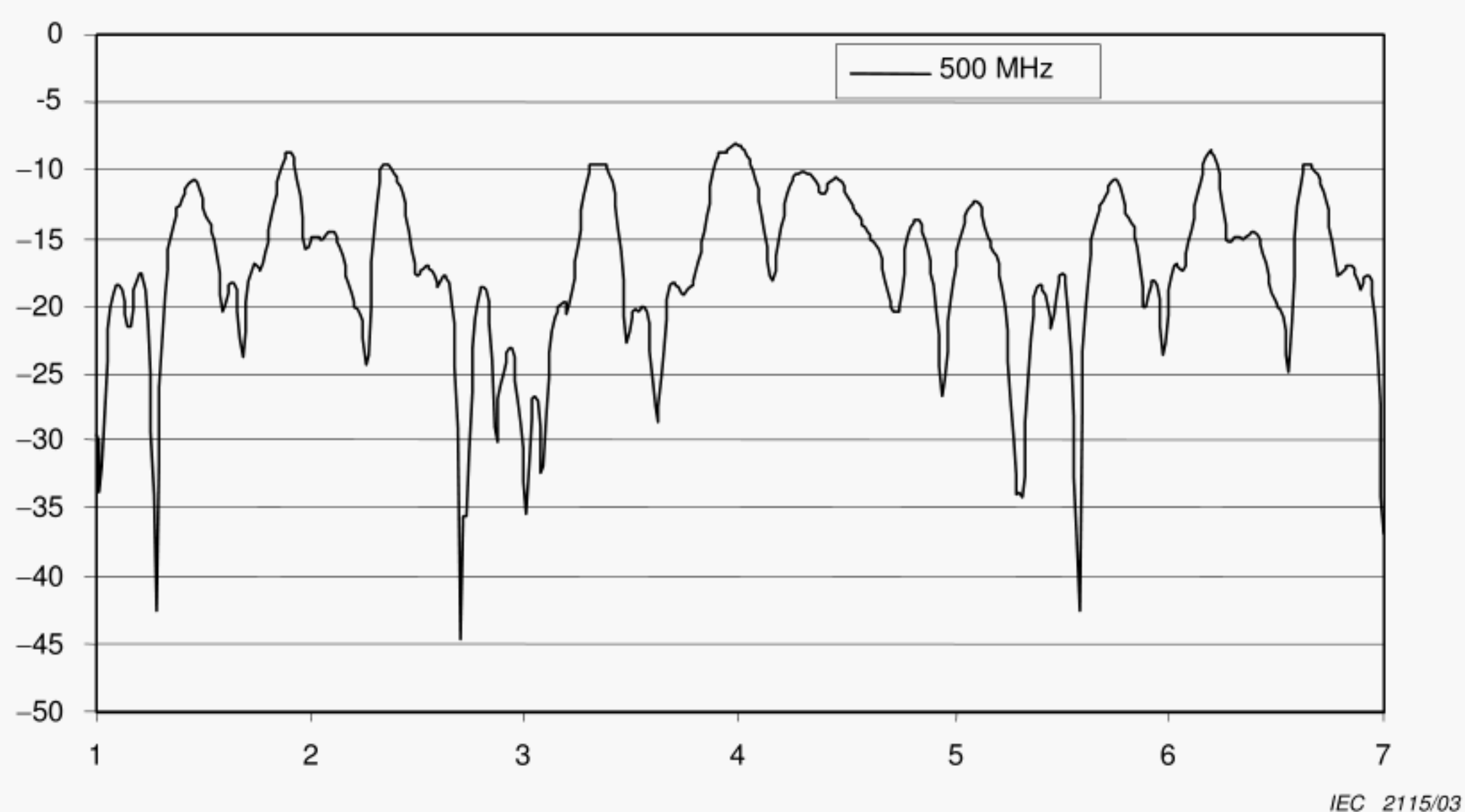
The following issues shall be addressed when using mode stirring:

- a) response/cycle time of the EUT;
- b) rotation rate of the tuner/stirrer (i.e., rate of change of the field);
- c) effect of stirring on accuracy of the validation;
- d) due to the various interactions between tuner/stirrer size, chamber size, rotation rate, and rate-of-change of the field, any susceptibility that is related to the rate-of-change of the field may not be reproducible in chambers with substantially different characteristics.

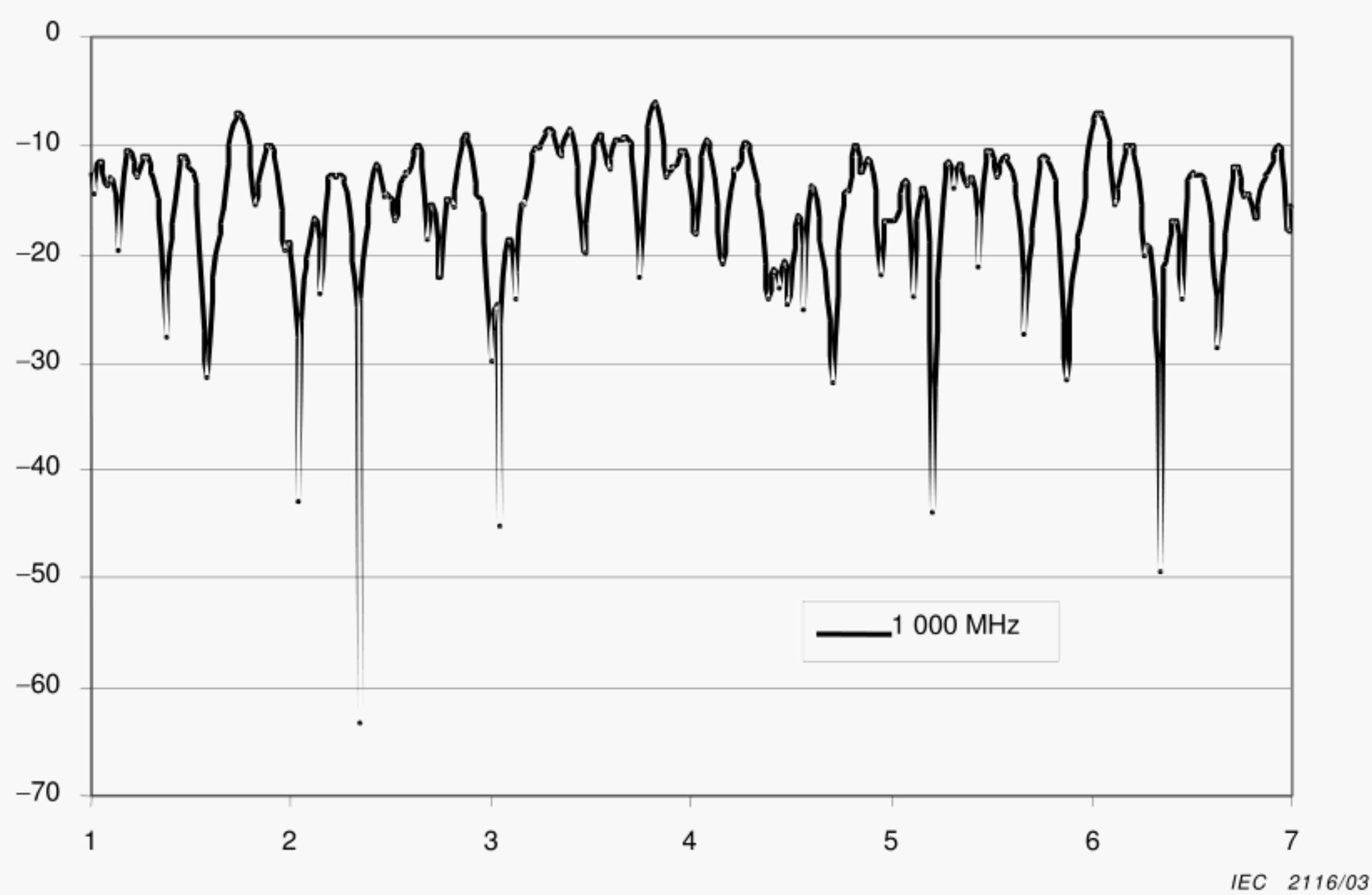
## C.5 Reference documents

- [1] ARNAUT, LR., Effect of local stir and spatial averaging on the measurement and testing in mode-tuned and mode-stirred reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, Aug. 2001, vol. 43 no. 3, pp. 305-325.
- [2] ARNAUT, LR., On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, Nov. 2005, vol. 47 no. 4, pp. 781-804.
- [3] ARNAUT, LR., Nonstationary effects in mode-stirred reverberation, Proc. 15th Zürich Int. Symp. Techn. Exhib. EMC (18-20 Feb. 2003, Zürich, Switzerland), pp. 245-250.
- [4] ARNAUT, LR., Angular spectral plane-wave decomposition of nonstationary random fields in mode-stirred reverberation, Phys. Rev. E, vol. 81, 041133, 2010.





**Figure C.1 – Received power (dBm) as a function of tuner rotation (s) at 500 MHz**



**Figure C.2 – Received power (dBm) as a function of tuner rotation (s) at 1 000 MHz**



## Annex D (normative)

### Radiated immunity tests

#### D.1 Test set-up

The typical test set-up should be as shown in Figure D.1. The equipment layout should be representative of the actual installation. The EUT shall be at least  $\lambda/4$  from the chamber walls at the lowest usable frequency (LUF) of the chamber. EUTs designed for tabletop operation shall be located at least  $\lambda/4$  from the chamber floor. Floor standing EUTs shall be supported 10 cm above the floor by a low-loss dielectric in the area beneath the uniform volume. The layout of the test equipment and cables shall be described in the test report, in order to assist in clarifying, explaining and reproducing unique or anomalous test results.

The chamber should remain free of any unnecessary absorbing materials. Items such as wooden tables, carpets, wall and floor coverings, and ceiling tiles shall not be used. Exposed light fixtures are also a source of potential loading. For new chambers, it is recommended that an evaluation of the chamber be performed prior to installation of any support equipment other than doors, vents and access panels. Support equipment such as tables, etc., should be non-metallic and low-absorbing. The EUT and all supporting equipment shall not occupy more than 8 % of the total chamber volume.

The transmit antenna should be in the same location as the one used for validation. The transmit antenna shall not directly illuminate the EUT or the receive antenna. Directing the antennas into the corners of the chamber is a recommended configuration. Appropriate modes of operation, software installation and stability of the EUT, test equipment and all monitoring circuits and loads shall be established.

#### D.2 Validation

Prior to collecting data, a check shall be performed to determine whether the EUT and/or its support equipment may have adversely loaded the chamber. This check shall be performed as outlined in Clause B.2. If mode-stirred procedures are used, care shall be taken to ensure that the issues associated with stirring, as outlined in Annex C, are adequately addressed.

#### D.3 Radiated immunity test procedures

##### D.3.1 Warning

**CAUTION:** RF fields can be hazardous. Observe applicable national RF exposure limits.

##### D.3.2 Determining chamber input power requirements

Determine the chamber input power  $P_{\text{input}}$  (in W) that is required to meet the test requirements for the electric field intensity using the equation:

$$P_{\text{input}} = \left[ \frac{E_{\text{test}}}{\langle \ddot{E} \rangle_{24 \text{ or } 9} \times \sqrt{CLF(f)}} \right]^2 \quad (\text{D.1})$$

where



$P_{\text{Input}}$	is the forward power (in W) injected into the chamber to achieve the desired field strength for the immunity test,
$E_{\text{test}}$	is the required field strength (in V/m) for the immunity test,
$CLF(f)$	is the chamber loading factor (dimensionless) at frequency $f$ (B.2 (7)), and
$\left\langle \vec{E} \right\rangle_{24 \text{ or } 9}$	is the average of the normalized $E$ -field (in (V/m)/ $W^{0,5}$ ), obtained from the empty chamber validation (see B.1.2 (10)(b) or (c)). It will be necessary to interpolate linearly between the validation frequency points, while validation at a finer step interval is also an option.

### D.3.3 Selecting frequency sweep/step rates/intervals

#### D.3.3.1 General

Frequency sweep or step rates shall be selected with consideration of equipment under test (EUT) response time, EUT susceptibility bandwidths and monitoring test equipment response time. The scan rate selected shall be justified by this criterion, and documented in the test report.

Unless otherwise specified by the test plan, the following guidance will be used for selecting test frequencies.

#### D.3.3.2 Discrete frequency testing

For test equipment that generates discrete frequencies, the minimum number of test frequencies shall be 100 frequencies per decade. The test frequencies shall be logarithmically spaced. As an example (above 100 MHz), a formula which can be used to calculate these frequencies in ascending order is as follows [4]<sup>6</sup>:

$$f_{n+1} = f_n \times 10^{\frac{1}{N-1}} \quad (\text{D.2})$$

where

$n$  is an integer;

$n = 1$  to  $N$  with  $N \geq 100$ , and

$f_n$  is the  $n^{\text{th}}$  test frequency ( $f_1$  is the start frequency and  $f_N$  is the end frequency).

The dwell time at each test frequency shall be at least 0,5 s, exclusive of test equipment response time and the time required to rotate the tuner (to a full stop) (see Annex C for cautions on stirring). Therefore, the minimum test time for one decade of frequencies shall never be less than 50 s per tuner position. Additional dwell time at each test frequency may be necessary to allow the EUT to be exercised in appropriate operating modes and to allow for the “off time” during low frequency modulation. At least two full cycles of modulation shall be applied. For example, if the applied modulation is a 1 Hz square wave (SW) modulation, the dwell time shall not be less than 2 s. The dwell time selected shall be justified based on EUT and test equipment response time, as well as applied modulation, and documented in the test report.

#### D.3.3.3 Swept frequency testing

Swept frequency excitation may cause the chamber field to become non-stationary [5, 6]. Therefore, discrete frequencies shall be used, unless a sweep rate is specified by the product committee. The use of stirring in conjunction with swept frequency testing is discouraged.

<sup>6</sup> Figures in square brackets refer to Clause D.6, Reference documents, at the end of this annex.



NOTE Additional test frequencies should be included for known equipment response frequencies, such as image frequencies (IFs), clock frequencies, etc. Specific test, manufacturer or government/regulatory requirements may list a specific scan rate or frequency interval(s) that take(s) precedence.

## D.4 Performing the test

Since a reverberation chamber, unlike most other EMC test facilities, does not support plane waves at a given position (angle) of the mode tuner or stirrer, the propagation and EUT excitation conditions are different from those in a free-space environment. Therefore, preferred test levels and their associated confidence intervals may be substantially different from those in other test facilities. The maximum or average power density, as opposed to field strength, is the preferred quantity in view of the physical-statistical nature of the fields inside a reverberation chamber.

Perform testing using either mode-tuned or mode-stirred procedures. For mode-tuned operation, use the minimum numbers of steps as indicated by the chamber validation. The tuner should be rotated in evenly spaced steps so that one complete revolution is obtained per frequency. If mode-stirred procedures are used, it shall be ensured that the EUT is exposed to at least the number of samples as the validation equipment was during validation. Ensure that, for either procedure, the EUT is exposed to the field level for the appropriate dwell time. This is particularly important for mode-stirred operation.

NOTE 1 The chamber validation allows the number of steps to be reduced to 12 if the data indicate that an acceptable chamber performance can be achieved.

Monitor and record  $P_{\text{MaxRec}}$  and  $P_{\text{AveRec}}$  with the receiving antenna used in the validation of each frequency band to ensure that the required field strength is being generated. Use  $P_{\text{AveRec}}$  to ensure that the chamber loading has not changed from the validation in Clause D.2. Differences greater than 3 dB in  $P_{\text{AveRec}}$  from that obtained in Clause D.2 shall be resolved.  $P_{\text{MaxRec}}$  may also be used to estimate the peak *E*-field generated as outlined in Annex A.

Monitor and record the average values of  $P_{\text{Input}}$  and  $P_{\text{Reflected}}$ . Variations in  $P_{\text{Input}}$  over a tuner rotation greater than 3 dB should be noted in the test report.

Modulate the carrier as specified in the test plan. When modulation is applied, ensure that the peak amplitude complies with the definitions of the test plan.

Scan the frequency range to the upper frequency limit using the appropriate antennas and modulations.

NOTE 2 When using pulse modulation, ensure that the requirements of Clause B.3 are met.

NOTE 3 Linear interpolation between validation points will be required.

## D.5 Test report

The test report shall include the cable layout and positioning of the EUT relative to the cables and a diagram of the test set-up and/or photos.

In addition, the report shall include the following parameters for each test frequency, in addition to the reporting requirements related to the EUT:

- maximum received power from the receiving antenna used to monitor the field in the chamber;
- mean received power from the receiving antenna used to monitor the field in the chamber;
- forward power delivered to the chamber transmitting antenna;
- reflected power from the chamber transmitting antenna;

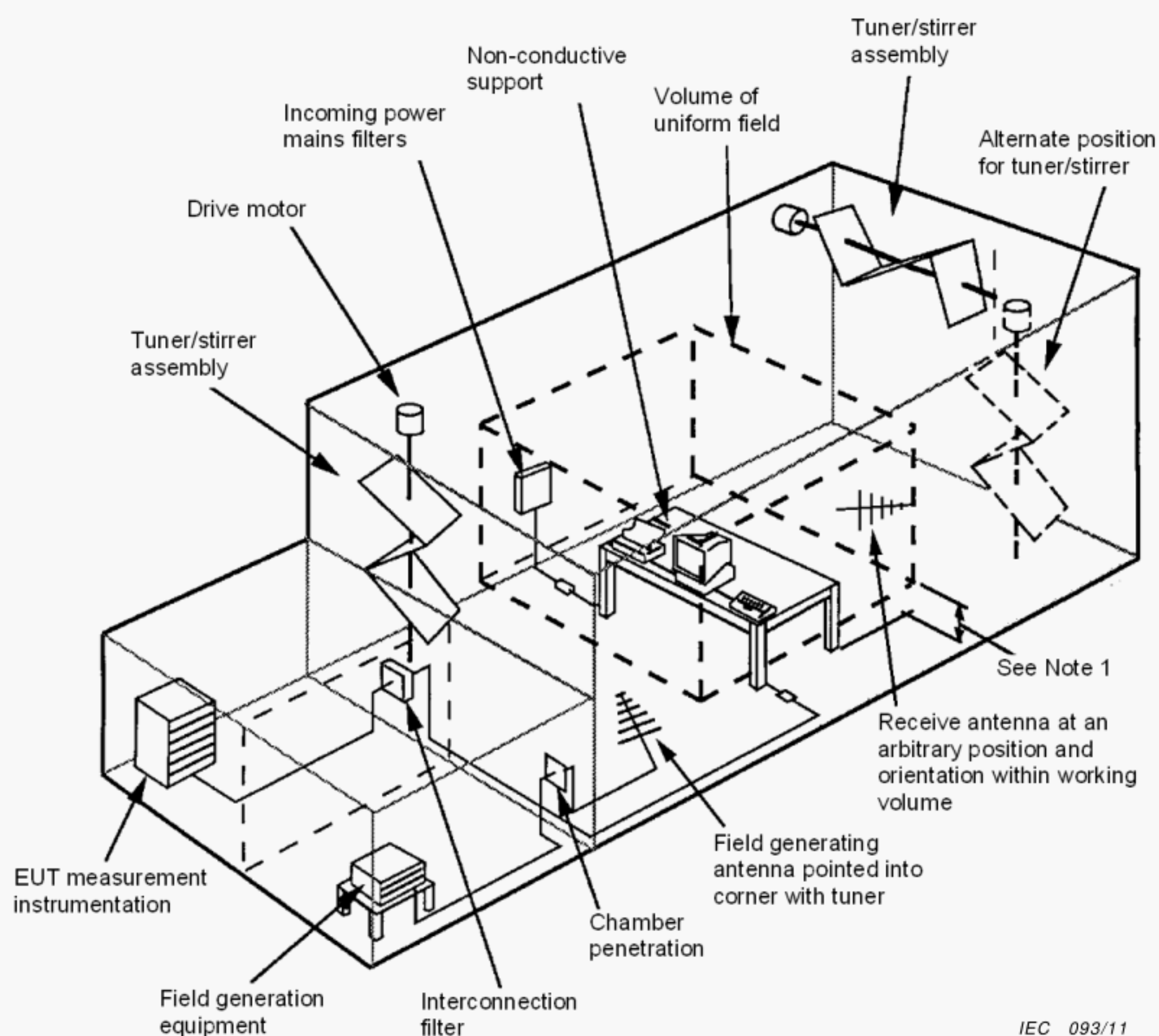


- e) variations in forward power during the data collection period greater than 3 dB;
- f) differences greater than 3 dB between field levels based on chamber input power and that calculated using the methods of A.5.4 which could not be resolved.

## D.6 Reference documents

- [1] KOEPKE, G. and HILL, D., Test device directivity for EMC measurements, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, 23 Aug. 2000, pp. 535-539.
- [2] FREYER, GJ. and BÄCKSTRÖM, M., Comparison of anechoic & reverberation chamber transfer function data as a function of directivity magnitude and pattern, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, 23 Aug. 2000, pp. 615-620.
- [3] FREYER, GJ. and BÄCKSTRÖM, M., Comparison of anechoic and reverberation chamber coupling data as a function of directivity pattern – Part II, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Montreal, Canada, Aug. 2001, pp. 286-291.
- [4] IEC 61000-4-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*
- [5] ARNAUT, LR., On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, vol. 47, no. 4, pp. 781-804, Nov. 2005.
- [6] ARNAUT, LR., Maximum rates of frequency scanning and mechanical or electronic stirring for distortionless signal generation inside electromagnetic reverberation chambers, Proc. 2008 EMC Europe Symposium, Hamburg-Harburg, Germany, 8-12 Sep. 2008.





NOTE 1 Test volume should be at least  $\lambda/4$  at the LUF from any chamber surface, field generating antenna or tuner assembly. (See Note 5 of Figure B.1)

NOTE 2 A non-conductive/non-absorbing support may be utilised if the EUT does not require a ground plane for proper operation.

NOTE 3 Polystyrene foam is a suitable support in most cases.

**CAUTION:** Foam materials may present a fire hazard if the EUT generates sufficient heat and/or when testing to field strengths that can induce arcing.

**Figure D.1 – Example of suitable test facility**



## **Annex E** (normative)

### **Radiated emissions measurements**

#### **E.1 Overview**

This annex covers the use of reverberation chambers to make radiated power measurements of emissions [1]<sup>7</sup> (both intentional and/or unintentional). This annex does not cover all of the nuances of emissions measurements. Information on measurement apparatus can be found in CISPR 16-1-1. In general the information found in CISPR 16-1-1 applies without modification when making measurements using a reverberation chamber.

There are two exceptions which require additional consideration:

- a) the distortion of short duration pulses (typically defined as less than 10  $\mu$ s) by the chamber quality factor  $Q$ , and
- b) the apparent amplitude variation of the emitted signal due to motion of the mechanical tuner/stirrer.

Determination of suitable chamber  $Q$  (i.e., time constant) can be found in clause B.3. Effects of the tuner/stirrer should be considered when selecting the dwell time or rotation rate and when selecting the type of detector to be used.

#### **E.2 Test set-up**

Test set-up information contained in CISPR 16-2-3 applies to reverberation chamber testing. The only additional requirements are that the EUT shall be at least  $\lambda/4$  from the chamber walls and floor standing EUTs shall be supported 10 cm above the floor by a low loss/low permittivity dielectric support. The use of a ground plane is allowed if necessary for proper operation of the EUT. In addition, the need to manipulate the position of interface cables is eliminated and the support table should be non-absorbing as well as non-conductive. A typical test set-up is shown in Figure E.1.

The Tx antenna (used during chamber validation to check the chamber for loading) should remain in the chamber at the same location as used for validation. The Tx antenna shall not directly illuminate the EUT or the Rx antenna. The Rx antenna shall not be directly illuminated by the EUT (i.e., the Rx antenna should not be directed at the EUT). Directing the antennas into the corners of the chamber is an optimum configuration. Establish software installation, modes of operation and stability of the EUT, test equipment and all monitoring circuits and loads.

#### **E.3 Validation**

Prior to collecting data a check shall be performed to determine if the EUT and/or its support equipment have adversely loaded the chamber. This check shall be performed as outlined in Clause B.2. If mode-stirred procedures are used care shall be taken to ensure that the issues associated with stirring outlined in Annex C are adequately addressed. Once the loading check has been performed, the transmitting antenna shall be terminated into a characteristic impedance equivalent to the RF source used during validation.

---

<sup>7</sup> Figures in square brackets refer to Clause E.11, Reference documents, at the end of this annex.



## E.4 Radiated emissions (RE) test procedures

NOTE RF fields can be hazardous. Observe applicable national RF exposure limits.

Perform testing using either mode-tuned or mode-stirred procedures. Ensure that for either procedure the EUT is sampled by at least the number of samples as the validation equipment was during validation. For mode-tuned operation, use the minimum number of samples as indicated by the chamber validation. The tuner should be rotated in evenly spaced steps so that one complete revolution is obtained per frequency. If mode-stirred procedures are used, it shall be ensured that the EUT emissions are sampled with at least the number of samples collected during the chamber validation. As with mode-tuned, the mode-stirred samples should be uniformly spaced over one complete tuner rotation.

Assure for either procedure that the EUT is monitored at each sample for a time period sufficient to detect all emissions (see CISPR 16-2-3 for guidance on receiver scan times). This is particularly important for mode-stirred operation. Mode-stirred procedures should only be applied for unmodulated signals using a peak detector. Due to the amplitude variation of the received signal caused by the motion of the tuner, testing time will usually be increased if a peak detector is to be used. Mode stirring is not applicable when using an average or other weighting detector.

For modulated (i.e., non-sinusoidal) emissions, radiated mean power (i.e., averaged over the resolution bandwidth) within the measurement bandwidth will be measured if a RMS detector is used. If the emissions spectrum is wider than the measurement bandwidth, the total radiated power can be measured by integrating the power spectral density over the emission spectrum associated with the modulation.

Monitor and record  $P_{\text{MaxRec}}$  and/or  $P_{\text{AveRec}}$  as specified in the test plan with the Rx antenna used in the validation of each frequency band.

**CAUTION:** To get an accurate measure of  $P_{\text{AveRec}}$ , the noise floor of the receiving equipment shall be at least 20 dB below  $P_{\text{MaxRec}}$ .

Scan the frequency range to the upper frequency limit using the appropriate antennas and bandwidths. The scan time for this procedure should be as specified in the test plan.

## E.5 Determining radiated power

Measuring the amount of power received by the receive antenna and correcting for chamber losses can be used to determine the amount of RF power (within the measurement bandwidth) radiated by a device placed in the chamber. In this standard, the radiated power is determined from a substitution method [2] using data from the chamber validation, augmented with a correction factor that takes into account the loading of the chamber by the emitting EUT.

The power radiated from a device can be determined, using either average or maximum received power, as

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{AveRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{\text{CVF}} \quad (\text{E.1})$$

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{MaxRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{\text{CLF} \times \text{IL}} \quad (\text{E.2})$$

where

$P_{\text{Radiated}}$  is the radiated power from the device (within the measurement bandwidth),

$\text{CVF}$  is the chamber validation factor (B.2 (6)),



$CLF$	is the chamber loading factor (B.2 (7)),
$IL$	is the chamber insertion loss (B.1.4),
$P_{AveRec}$	is the received power (within the measurement bandwidth) as measured by the reference antenna averaged over the number of tuner steps Clause (E.4),
$P_{MaxRec}$	is the maximum power received (within the measurement bandwidth) over the number of tuner steps Clause (E.4), and
$\eta_{Tx}$	is the antenna efficiency factor for the Tx antenna used in calibrating the chamber and can be assumed (if not known) to be 0,75 for a log periodic antenna and 0,9 for a horn antenna.

Equation (E.1) is used for average-received-power-based measurements and Equation (E.2) is used for maximum-received-power-based-measurements. The advantage of using measurements based on average power is a lower uncertainty. The disadvantage is that the measurement system shall have sensitivity of 20 dB lower than the measured  $P_{MaxRec}$  to get an accurate average measurement.

NOTE Other methods for measuring emission have been proposed that avoid a need for prior chamber validation, but make use of time-domain measurement of the pulse decay with the EUT as source [3]. Provided allowance is made for the fact that the Q-factor determined from pulse-decay measurement (Equation (A.11) for measured  $\tau$ ) may deviate from its value obtained from CW measurements (Equation (A.10)), these methods yield comparable results for the estimated total radiated power with those obtained using Equation (E.1).

## E.6 Estimating the free space (far) field generated by an EUT

The field strength generated by the EUT at a distance of  $R$  meter(s) can be estimated by using the equation:

$$E_{Radiated} = \sqrt{\frac{D \times P_{Radiated} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \quad (E.3)$$

where

$E_{Radiated}$	is the estimated field strength generated by the EUT (in V/m),
$P_{Radiated}$	is the radiated power from Clause E.5 (in W),
$R$	is the distance from the EUT (in m) and shall be a sufficient distance to ensure far field conditions exist,
$\eta_0$	is the intrinsic impedance of free space, approximately equal to 377 $\Omega$ , and
$D$	is the maximum directivity of the EUT (dimensionless).

NOTE A directivity value of  $D = 1,7$  is often used as it represents the assumption that the EUT radiation pattern is the equivalent of a dipole radiator of length between one half and one full wavelength. It is recommended that a factor of 1,7 be used unless the product committee can supply a more appropriate value. Recent research on device directivity can be found in [4], [5].

The calculated disturbance field strength is not always compatible with measurement results given at the open area test sites (OATSS) or similar test sites. This compatibility if required shall be shown by specific procedures for EUT types or product groups.

## E.7 Estimating the half space (far) field generated by an EUT

The field strength generated by the EUT at a distance of  $R$  meter(s) at height  $h$  above a perfect conducting ground plane can be estimated by using the equation:

$$E_{Radiated} = g_{max} \sqrt{\frac{D \times P_{Radiated} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \quad (E.4)$$

where the symbols have the same meaning as in Equation (E.3), and where



$g_{\max}$  is the dimensionless geometry factor accounting for ground plane reflections.

The geometry factor accounts for the height scan, which is typically performed under half space conditions and is given by the following equation:

$$g_{\max} = \begin{cases} \left| \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} - \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\max} & \text{for horizontal polarization} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\max} & \text{for vertical polarization} \end{cases} \quad (\text{E.5})$$

where

$r = \sqrt{s^2 + R_h^2}$  is the distance from the antenna to the perpendicular foot of the EUT (in m),

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_h - h)^2}$  is the length of the direct beam (in m),

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_h + h)^2}$  is the length of the reflected beam (in m),

$s$  is the measurement distance (in m),

$R_h$  is the antenna height (in m).

The relevant geometry is shown in Figure E.2. The maximum value is taken with respect to the height scan of the receiving antenna (parameter  $R_h$ ). For a typical OATS measurement ( $s = 10$  m,  $h = 1$  m, height scan between 1 m and 4 m)  $g_{\max}$  is approximately equal to 2 for frequencies above 200 MHz, for both horizontal and vertical polarization. Conversion procedures for radiated power emissions estimated from E-field probe measurements and with reference to OATS measurements have been demonstrated in [6] and [7], respectively.

## E.8 Maximum directivity

For an electric or magnetic dipole that is short compared to the wavelength, the maximum directivity is 1,5. For the combination of a magnetic and electric dipole the maximum directivity is 3. For an electrically large EUT the assumption of dipole-like radiation is typically insufficiently accurate, resulting in a larger maximum directivity. Provided the radiation of the EUT is sufficiently close to omnidirectional radiation, apart from showing narrow isolated beams in certain directions, the expected maximum directivity  $D$  for an unintentional radiator can be approximated based on the radius  $a$  of the smallest surrounding sphere:

$$D = \begin{cases} 1,55 & \text{for } ka \leq 1 \\ 0,5 \left( 0,577 + \ln(4(ka)^2 + 8ka) + \frac{1}{8(ka)^2 + 16ka} \right) & \text{for } ka > 1 \end{cases} \quad (\text{E.6})$$

It is recommended to use the maximum value  $D = 3$  for dipole radiation or  $D$  according to Equation (E.6), unless the product committee can supply a more appropriate value.



## E.9 Measurement uncertainty

For estimation of measurement uncertainty associated with radiated emissions, see Annex K and [8]. In general, the uncertainty depends on impedance mismatch of the EUT and the receiving antenna, and on the insertion loss of the empty chamber.

## E.10 Test report

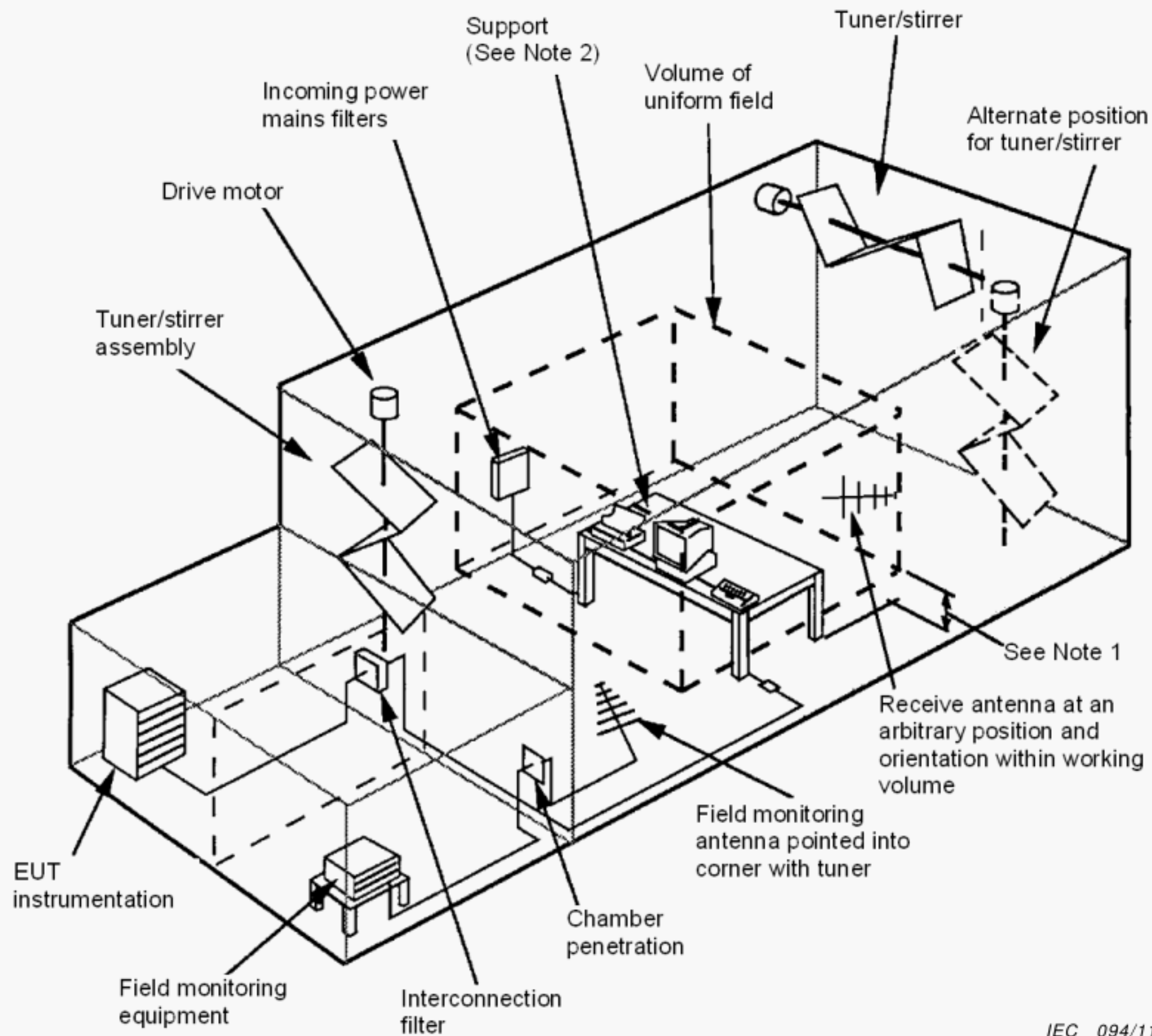
The test report should include the following parameters for each test frequency, in addition to the reporting requirements related to the EUT:

- a) maximum received power from the receive antenna if recorded;
- b) mean received power from the receive antenna if recorded;
- c) power emitted by the EUT as defined in Clause E.5;
- d) if estimated E-field is required to be reported then the assumed directivity used to calculate the E-field (see Equation (E.3)) shall also be reported;
- e) loading data as required by Clause E.3;
- f) cable layout and positioning of the EUT relative to the cables;
- g) diagram of the test set-up (e.g., photos).

## E.11 Reference documents

- [1] HARRINGTON, TE., Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, 22 Aug. 2000, pp. 23-28.
- [2] CORONA, P., LATMIRAL, G. , PAOLINI, E., and PICCIOLI, L., Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. EMC., vol. 18 no. 2, May 1976, pp. 54–59; Comments and corrections, IEEE Trans. EMC, vol. 18 no. 4, Nov. 1976, p. 205.
- [3] KRAUTHÄUSER, HG., On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, vol. 49 no. 2, pp. 270-279, May 2007.
- [4] BÄCKSTRÖM, M., LORÉN, J., ERIKSSON, G., and ÅSANDER, H-J., Microwave Coupling into a Generic Object. Properties of Measured angular Receiving Pattern and its Significance for Testing, Proc.IEEE Int. Symp. EMC, Montreal, Canada, Aug. 13-17, 2001, pp. 1227-1232.
- [5] WILSON, P., KOEPKE, G., LADBURY, J., and HOLLOWAY CL., Emission and Immunity standards: Replacing Field-at-a-Distance Measurements with Total-Radiated Power Measurements, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Montreal, Canada, Aug. 13-17, 2001, pp. 964-969.
- [6] GARBE, H. and BATTERMAN, S., Converting total-radiated-power measurements to equivalent E-field data, Proc.IEEE Int. Symp. EMC, Detroit, MI, August 18-22, 2008.
- [7] VAN DIJK, N., New concepts for EMC standards applicable to multimedia products, Doctoral Thesis, TU Eindhoven University Press, Eindhoven, The Netherlands, Jun. 2007.  
[<http://alexandria.tue.nl/extra2/200710787.pdf>]
- [8] ARNAUT, LR., Measurement uncertainty in reverberation chambers – I. Sample statistics, National Physical Laboratory (UK), Report TQE 2, Ed. 2.0, Dec. 2008.  
[[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/TQE2.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf)]





IEC 094/11

NOTE 1 Test volume should be at least  $\lambda/4$  at the LUF from any chamber surface, field generating antenna or tuner assembly. (See Note 5 of Figure B.1.)

NOTE 2 A non-conductive/non-absorbing support should be utilised if the EUT does not require a ground plane for proper operation.

NOTE 3 Polystyrene foam is a suitable support in most cases. Foam materials may present a fire hazard if the EUT generates sufficient heat.

NOTE 4 The chamber should remain free of any unnecessary absorbing materials. Items such as wooden tables, carpeting, floor and wall coverings, and ceiling tiles should not be used. Also exposed light fixtures are a source of potential loading. For new chambers, it is recommended that an evaluation of the chamber be performed prior to installation of any support equipment other than doors, vents and access panels. Support equipment such as tables, etc., should be non-metallic and non-absorbing.

**Figure E.1 – Example of suitable test facility**



Ground reflection:

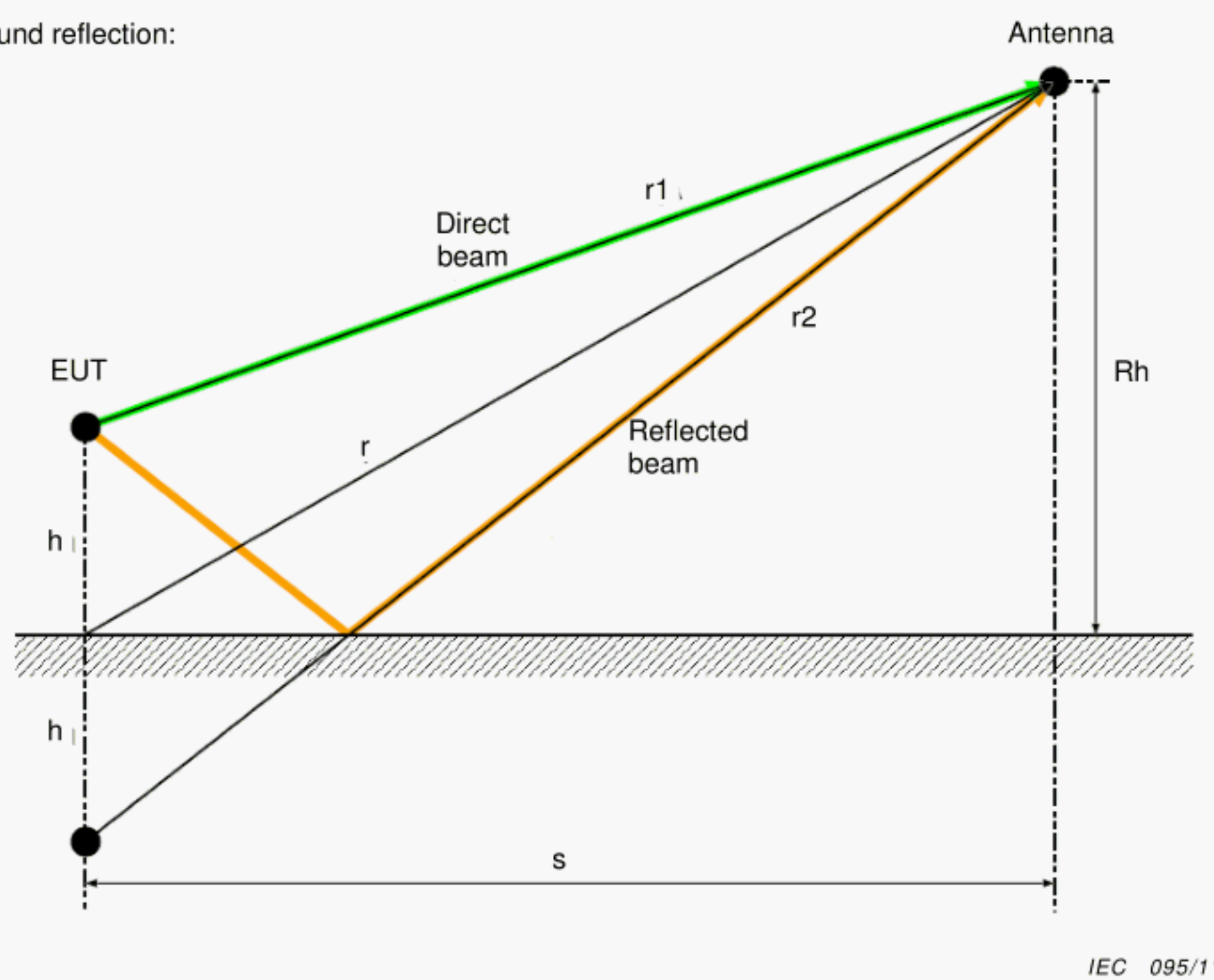


Figure E.2 – Relating to the calculation of the geometry factor for radiated emissions



## Annex F (informative)

### Shielding effectiveness measurements of cable assemblies, cables, connectors, waveguides and passive microwave components

#### F.1 Measurement of EUT shielding effectiveness

As in radiated immunity testing, there are many test techniques available to evaluate the shielding performance of gaskets, window materials, and other system configurations designed to provide shielding [1]<sup>8</sup>, [2], [3]. The measurement of shielding effectiveness in this annex is based on the comparison of the electromagnetic power outside the EUT to the electromagnetic power induced into the EUT. The shielding effectiveness  $SE$  is defined as:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{F.1})$$

where

$P_{\text{EUT}}$  is the power coupled to the equipment under test (in W), and

$P_{\text{Ref}}$  is the power coupled to the reference antenna (in W).

#### F.2 Test set-up description

##### F.2.1 The reverberation chamber

The shielded enclosure shall be modified with at least one extra access port to facilitate connection of the EUT. Some EUTs may require multiple access ports.

##### F.2.2 Antennas

The transmit and reference antennas are the same as used in the chamber validation.

##### F.2.3 Test set-up

The test equipment and components typically used for an automated shielding effectiveness measurement are shown in Figure F.1. Note that preamplifiers, amplifiers and other components might also be required to obtain the desired dynamic range.

##### F.2.4 Equipment under test (EUT)

The EUT is connected to the measurement equipment via a length of the appropriate media (i.e., coax, waveguide, etc.). To ensure that the EUT is within the volume of uniform field, this connection should be at least 1/3 of the wavelength long at the lowest test frequency. The test port of the EUT should be connected to the measurement equipment. Any other port(s) should be terminated into matched loads having a shielding effectiveness of at least 5 dB better than that of the EUT (or at least 10 dB above the desired shielding).

##### F.2.5 Linking devices

Linking devices are usually 50 Ω coaxial lines having shielding effectiveness at least 10 dB better than the EUT (or at least 10 dB above the desired shielding).

<sup>8</sup> Figures in square brackets refer to Clause F.5, Reference documents, at the end of this annex.



All linking devices shall be characterised for attenuation prior to beginning the test. This includes linking devices for both the EUT and reference antenna. See Figure F.1.

### **F.3 Measurement procedure**

#### **F.3.1 General**

Perform the testing using mode-tuned or mode-stirred procedures. For mode-tuned operation, use at least the number of steps used in the chamber validation. This is to ensure that the measurement uncertainty is the same or better than during the chamber validation. The tuner should be rotated in evenly spaced steps so that one complete revolution is obtained per frequency. For mode-stirred operation, the maximum tuner rotation rate shall be chosen such that the EUT (i.e., the monitoring receiver) is exposed to at least the same number of samples as the validation equipment was exposed to during validation. Ensure for either procedure that the EUT is exposed to the field level for the appropriate dwell time, particularly for mode-stirred operation. If mode-stirred procedures are used, care shall be taken to ensure that the issues associated with stirring outlined in Annex C are adequately addressed.

NOTE SE measurements are usually well suited for using stirring, provided the EUT and monitoring equipment have a fast response time, which is usually the case for measurements of this type.

The measured parameter can be either average received power or maximum received power. The average received power will yield a more accurate measurement. It does however require a measurement sensitivity of at least 20 dB below the maximum received power in order to collect accurate average data. For measurements based on the maximum received power, the dynamic range of the measurement system should be at least 10 dB greater than the desired shielding effectiveness.

#### **F.3.2 Measurement of the EUT**

The RF generator is connected to the chamber (through an amplifier if necessary) and delivers a constant input power at a fixed frequency to the chamber. The tuner/stirrer is operated in the desired manner.

The measurement equipment is connected to the EUT. The chamber reference antenna is connected to the chamber monitoring equipment.

After the appropriate number of samples or one tuner revolution, the desired parameter (i.e., the average received power or maximum received power) is recorded for each test frequency for both the reference antenna and the EUT.

The shielding effectiveness can then be calculated by taking into account the attenuation of the links for both the EUT and reference antenna.

NOTE Do NOT mix parameters! Compare maximum power received by the antenna to the maximum power received by the EUT or average power received by the antenna to the average power received by the EUT.

#### **F.3.3 Alternate method of measurement of the EUT**

If two sets of measurement equipment are not available, then the measurement equipment may be connected to the EUT and the reference antenna one at a time.

If two sets of links are used, then the shielding effectiveness shall be calculated by taking into account the attenuation of the links for both the EUT and reference antenna.

If only one set of linking devices is used, then the attenuation of the link can be ignored and the shielding effectiveness is the difference between the two received powers (peak or average).



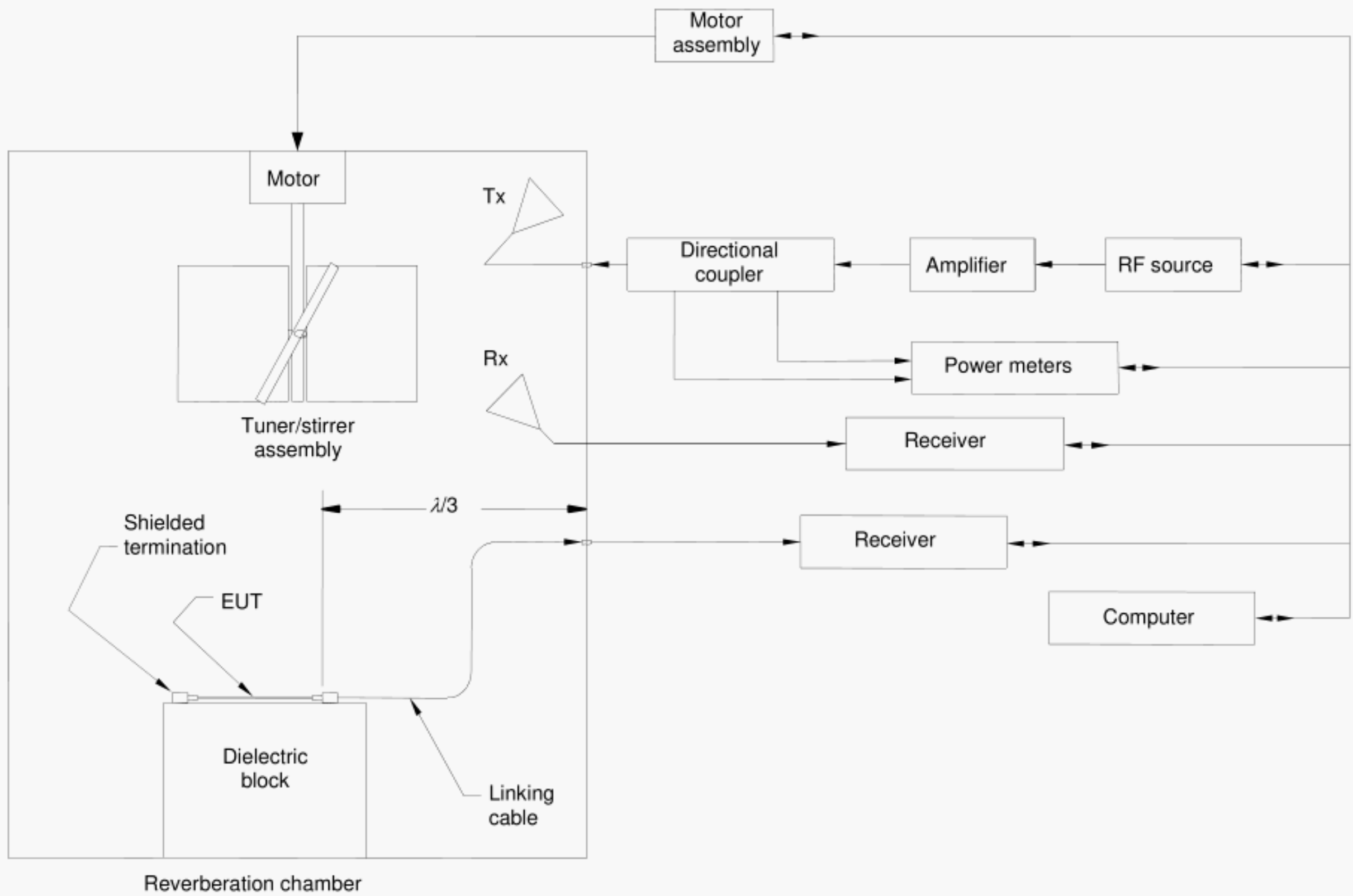
#### **F.4 Control of the test setup**

Prior to any measurements, the dynamic range of the test setup shall be checked using the same linking devices and terminations as for the EUT, except that the EUT will be replaced by a well-shielded device. The dynamic range shall be at least 5 dB larger than the desired shielding effectiveness.

#### **F.5 Reference documents**

- [1] IEC 61726, *Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components – Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method.*
- [2] IEC 60169-1-3, *Radio-frequency connectors – Part 1: General requirements and measuring methods – Section Three – Electrical tests and measuring procedures: Screening effectiveness*
- [3] IEC 61000-5-7, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-7: Installation and mitigation guidelines – Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)*





IEC 096/11

Figure F.1 – Typical test set-up



## Annex G (informative)

### Shielding effectiveness measurements of gaskets and materials

#### G.1 Overview

As in radiated immunity testing, there are many test techniques available to evaluate the shielding performance of gaskets, window materials, and other system configurations designed to provide shielding [1]<sup>9</sup>, [2], [3]. Typically, a shielding effectiveness (SE) measurement compares the electromagnetic (EM) environment inside an enclosure with and without the shielding material or gasket in place. SE test techniques are described in many sources of reference, such as MIL-STD-285 [12]. Unfortunately, many shielding effectiveness measurements are noted for their lack of repeatability and facility-to-facility comparability. Some of these discrepancies can be attributed to the test technique while the test article itself causes others. Many factors such as the condition of mating surfaces and torquing of fasteners can markedly affect the repeatability of SE measurements.

For many shielding designs (e.g., gaskets, windows, etc.), reverberation testing uses a "nested chamber" approach (i.e., a reverberation chamber within a reverberation chamber). A receiving antenna and paddle wheel tuner are installed in a test fixture to detect any RF energy that "leaks" into the fixture. Readers who are unfamiliar with the use of reverberation chambers for SE measurements should review one or more of the several available references [4], [5], [6], [7].

Many factors of a test set-up shall be carefully controlled to achieve repeatability in a SE test. Assuming one can control these factors, the uniformity of the EM environment in a reverberation chamber provides an all-aspect angle SE test with excellent repeatability from facility to facility.

NOTE 1 Minor differences in test fixture design/construction can have significant influence on test results. Fixture materials, bolt spacing, surface finishes, torque settings, etc. should all be controlled in order to get repeatable results. Due to the large number of parametric variations that would be needed in order to accommodate the many different gaskets and materials that require evaluation, this annex does not contain detailed design guidance for test fixtures at present. Development of a generic fixture(s) is under consideration for future editions.

NOTE 2 The procedures contained in this annex assume that a nominal amount of shielding is provided by the gasket or material being evaluated. If the shielding provided by the material and/or gasket under test is less than 10 dB, then the Quality Factor  $Q$  of the test fixture is not independent from the  $Q$  of the chamber. In such cases, the TFFV (G.3.8) is not applicable and the methods described in [8] should then be applied.

NOTE 3 This procedure assumes that the fixture aperture is very large (of the order of one full side of the test fixture). If this is the case then, using the test set-up shown in Figure G.1 and with the aperture removed, the power received on the reference Rx antenna should be similar to the power received by the Rx antenna. If this is not the case, then this procedure should not be used, and methods described in [8] should be applied.

#### G.2 Measurement of shielding effectiveness

The measurement of shielding effectiveness ( $SE$ ) is based on the comparison of the EM power outside the equipment under test (EUT) to the electromagnetic power that propagates into the EUT. The shielding effectiveness is defined as:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{G.1})$$

<sup>9</sup> Figures in square brackets refer to Clause G.7, Reference documents, at the end of this annex.



where

$P_{\text{EUT}}$  is the power coupled to the equipment under test, and

$P_{\text{Ref}}$  is the power coupled to the reference antenna.

### G.3 Test set-up description

#### G.3.1 General

For testing gaskets and materials, it is usually required to construct a test fixture to which the item to be evaluated is mounted. In some cases, entire enclosures can be constructed out of the material to be evaluated. In such cases, the procedures in Annex H should be used. The reverberation chamber method of measuring SE uses a "nested chamber" approach. A receiving antenna and mechanical tuner/stirrer are installed in the test fixture to detect any RF energy that "leaks" into the fixture. The mechanical tuner/stirrer should be as large as possible and still maintain a separation distance of  $\lambda/4$  from receive antenna. An example of a "nested chamber" is shown in Figure G.1. For test items such as materials and windows, apertures may be cut out of the cover plate.

NOTE The procedures in this annex will not separate out shielding by an aperture from shielding provided by the gasket or material used in conjunction with that aperture. If such separation is desired, then the procedures outlined in [8] should be used.

#### G.3.2 Test set-up for materials

For testing materials, a test fixture is required. An example of a fixture is shown in Figure G.2. It should have surfaces compatible with the gasket to be used. The material to be evaluated can be substituted for, or mounted to an aperture on, the cover plate during testing. The size of the fixture determines the lowest frequency at which usable data can be obtained. For most fixtures, this lowest usable frequency can be estimated by determining the frequency at which the fixture has about 60 modes. The formula for determining this frequency is shown in G.3.8 (1). Otherwise, calibrate the fixture using the procedure from B.1.2.

#### G.3.3 Test set-up for gaskets

For testing gaskets, a test fixture is required. An example of a fixture is shown in Figure G.2. It should have surfaces representative of the application. The size of the fixture determines the lowest frequency at which usable data can be obtained. For most fixtures, this lowest usable frequency can be estimated by determining the frequency at which the fixture has about 60 modes. The formula for determining this frequency is listed in G.3.8 (1). Otherwise, determine the lowest usable frequency of the fixture using the procedure from B.1.2.

#### G.3.4 Reverberation chamber

The shielded enclosure shall be fitted with multiple access ports to facilitate connection of the test fixture to the measurement equipment.

#### G.3.5 Antennas

The Tx antennas used shall be efficient at the frequencies to be tested. It is most important that the efficiency of the Tx antennas in the fixture is as high as possible.

The efficiency of the Rx antenna shall be the same for characterising the test fixture and for collecting the shielding data. It is recommended that the same antenna be used.

The efficiency of the receive antenna is not critical. However, to ensure good dynamic range, it should be as high as possible.



### G.3.6 Test set-up

The essential test equipment and components required for an automated shielding effectiveness measurement are shown in Figure G.1. Note that preamplifiers, amplifiers, and other components might also be required to obtain the desired dynamic range.

### G.3.7 Linking devices

Linking devices are usually 50  $\Omega$  coaxial lines, having shielding effectiveness at least 10 dB above the desired shielding effectiveness.

All linking devices shall be characterised for attenuation prior to beginning the test. This includes linking devices for the EUT Rx antenna, Tx antenna(s), and reference antenna.

### G.3.8 Test fixture validation

Before performing any testing the test fixture should be calibrated. The purpose is to determine the quality factor  $Q$  of the test fixture so that any effect of the cavity  $Q$  on the received signal can be accounted for. The validation procedure is as follows:

- (1) Determine the lowest usable frequency for the test fixture by calculating the frequency at which the fixture has at least 60 possible modes ( $N = 60$ ) using the following formula (valid for rectangular enclosures) [4]:

$$N = \frac{8\pi}{3} abd \frac{f^3}{c^3} - (a + b + d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (\text{G.2})$$

where

$a, b, d$  are the fixture dimensions (in m),  
 $c$  is the speed of wave propagation in the fixture (in m/s), and  
 $f$  is the frequency (in Hz).

NOTE 1 The smallest dimension of the fixture aperture should be at least  $\lambda/2$  at the lowest useable frequency in order to minimize cut-off effects. Equation (G.2) can be generalized for test fixtures of arbitrary (non-rectangular) shape, including curved boundaries [8].

- (2) Configure the test fixture for validation by installing a transmit antenna inside the test fixture as shown in Figure G.3. The mechanical tuner should be as large as possible and still maintain a separation distance of  $\lambda/4$  from the Rx antenna. Directing the Rx antenna into a corner is desirable. Directing the Rx antenna at the tuner/stirrer is acceptable. Feed points into the test fixture for the Rx antenna linking device and tuner/stirrer power should be well shielded. Shielding of the feed points should be at least 5 dB above the desired shielding effectiveness.
- (3) Configure the test fixture as it will be for the test, by installing the gasket and/or material to be tested. For each test frequency, input a known power to the Tx antenna inside the test fixture (i.e., validation shall be relative to the Tx and Rx antenna terminals). At the tuner position that results in the maximum received signal, record the maximum power received by the test fixture Rx antenna over one rotation of the tuner inside the test fixture, and record the forward and reflected power present at the test fixture Tx antenna.

NOTE 2 SE testing is well suited for mode-stirring techniques due to the generally fast response time of the receivers employed. If stirring is used, ensure that the issues in Annex C are adequately addressed. If mode tuning is used, use at least the minimum number of steps outlined in Annex B with  $f_s$  set to the frequency at which the test fixture has 60 possible modes.

- (4) Determine the test fixture validation factor ( $TFVF$ ) (in linear) by taking ratio between the transmitted power and the maximum received power:



$$TFVF = \frac{P_{\text{MaxRec}}}{P_{\text{Input}}} \quad (\text{G.3})$$

where

$P_{\text{MaxRec}}$  is the maximum received power (in W) at the antenna terminals by the test fixture receive antenna over one rotation of the tuner mounted inside the test fixture, and

$P_{\text{Input}}$  is the net power input to the antenna terminals (in W) of the transmit antenna inside the test fixture. The input power is calculated from the forward and reflected power measurements in Step (3) as  $P_{\text{Input}} = P_{\text{Forward}} - P_{\text{Reflected}}$ .

- (5) If time permits, repeat this procedure two more times, using different locations of the Tx and Rx antennas within the test fixture. For each frequency, use the average of the maximum received powers to determine the insertion loss (i.e., when three combinations of the Tx and Rx antennas are to calibrate the test fixture, use the average of the three maximum readings to calculate  $TFVF$  for each frequency). The transmit power shall be the same for each run. If the same transmit power is not used for each run, then calculate the  $TFVF$  for each run followed by calculating the average  $TFVF$  for the fixture.

### G.3.9 Determining measurement dynamic range

Before performing any testing, the dynamic range of the measurement should be determined as follows:

- (1) Remove the material or cover plate from the test fixture and ensure that the receive antenna is in place.

NOTE 1 This should equate to essentially one side of the fixture being removed.

- (2) Remove the transmit antenna and transmit linking devices from the fixture and attach a shielded termination to the transmit antenna linking port of the test fixture. This shielded termination should have at least 10 dB more shielding than the shielding to be measured.
- (3) For each test frequency, transmit a known power into the chamber transmit antenna (again, validation shall be relative to the antenna terminals) and record the maximum power received by the test fixture receive antenna over one rotation of the chamber tuner.

NOTE 2 SE testing is well suited for mode-stirring techniques due to the generally fast response time of the receivers employed. If stirring is used, ensure that the issues in Annex C are adequately addressed. If mode tuning is used, use at least the number of steps used to calibrate the chamber.

- (4) Replace the test fixture Rx antenna with a well-shielded termination.
- (5) Repeat Step (3).

NOTE 3 The same input power to the chamber should be used or the received power from each data point should be normalized to the chamber input power.

- (6) Replace the test fixture Rx antenna.
- (7) Determine the dynamic range of the measurement set-up (in dB) by taking the ratio between the readings recorded in Steps (3) and (5). Make a correction for the test fixture insertion loss as shown in (G.4), ensuring that this value is greater than the desired shielding by at least 5 dB

$$\text{Dynamic Range} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Rx Antenna}}}{P_{\text{Rx Termination}}} \right) + 10 \log_{10}(TFVF) \quad (\text{G.4})$$

where

$P_{\text{Rx Antenna}}$  is the maximum power received by the test fixture Rx antenna,

$P_{\text{Rx Termination}}$  is the maximum power received by the test fixture Rx antenna terminals with the antenna replaced by the termination, and

$TFVF$  is the test fixture validation factor obtained from G.3.8 (4).



## G.4 Measurement procedure

### G.4.1 General

Perform the testing using mode-tuned or mode-stirred procedures. For mode-tuned operation, the chamber tuner shall use at least the same number of steps as used in the chamber validation. The test fixture tuner shall use the same number of steps as used in G.3.8(3). When using mode-tuned procedures, both chamber tuners should be rotated in a manner that results in the test fixture tuner making one complete revolution for each step of the chamber tuner. When using mode-stirred procedures, the maximum stirrer rotation rate shall ensure that the EUT and the associated measurement equipment is exposed to at least the number of samples that would be encountered using mode-tuned techniques. Ensure that for either procedure the measurement equipment is allowed to sample the field level for the appropriate dwell time. This is particularly important for mode-stirred operation.

NOTE It is often convenient to use a combination of tuning and stirring. The chamber tuner is rotated one complete rotation using the same number of steps used in the chamber validation while the test fixture stirrer is rotated continuously. For each position (step) of the chamber tuner, the test fixture tuner rotates one complete revolution. The rotation rate of the test fixture tuner is the same as used in G.3.8(3). This ensures that the sampling rate of the measurement equipment is such that the required number of samples is obtained over each rotation of the test fixture tuner. For guidance on the maximum stirring rate, see Annex C.

The measured parameter is the maximum received power. For measurements based on the maximum received power, the dynamic range of the measurement system should be at least 5 dB more than the desired shielding.

### G.4.2 Measurement of the EUT

The procedure is the following.

- (1) Connect the RF source to the chamber (through an amplifier if necessary).
- (2) Connect the measurement equipment to the test fixture Rx antenna (through a pre-amplifier if necessary).
- (3) Connect the chamber reference antenna to the chamber monitoring equipment (through an attenuator if necessary).
- (4) Install the gasket and/or material to be tested onto the test fixture.
- (5) Start the chamber and test fixture tuner(s)/stirrer(s) in motion.
- (6) Inject the first test frequency into the chamber at a fixed input power.
- (7) Record the maximum reading from the chamber monitoring equipment and the EUT monitoring equipment over one complete cycle of the tuner(s)/stirrer(s).
- (8) Repeat Step (7) for all test frequencies.
- (9) Install a known shield material (e.g., aluminium or copper foil or tape) over areas of suspected leakage. Do NOT apply additional shielding to the feed points or any other area of the test fixture that is not a part of the evaluation.
- (10) Perform a leakage test by repeating Steps (5) through (8).

NOTE The same input power to the chamber should be used for both data collection and leak test. If a different input power is used, then all the data should be normalized to the chamber input power prior to calculating the SE.

- (11) The shielding effectiveness  $SE$  (in dB) can then be calculated using the following equation, taking into account the attenuation of the links for both the EUT and reference antenna:



$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) - 10 \log_{10}(TFVF) \quad (\text{G.5})$$

where

$P_{\text{EUT}}$  is the maximum power received by the test fixture Rx antenna (corrected for link loss),

$P_{\text{Ref}}$  is the maximum power received by the chamber reference antenna (corrected for link loss), and

$TFVF$  is the test fixture validation factor obtained from G.3.8(4), Equation (G.3).

- (12) The “leak” test in Step (10) ensures that the measured leakage has entered through an area of the test fixture that was part of the evaluation and is not a result of a modification to the test fixture, such as the feed points for the tuner power and receive lines. Determine the  $SE$  of this configuration using Equation (G.5) by substituting the received powers from Step (10). If the  $SE$  obtained from Step (10) is not at least 5 dB more than the  $SE$  obtained from the unmodified test set-up, then the  $SE$  is considered to be greater than or equal to the  $SE$  of the unmodified test set-up. If higher  $SE$  is desired, then more investigations as to the points of entry into the measurement system are warranted.

#### G.4.3 Alternative method of measurement of the EUT

If two sets of measurement equipment are not available, then the measurement equipment may be connected to the EUT and the reference antenna one at a time.

If two sets of linking are used, then the shielding effectiveness shall be calculated by taking into account the attenuation of the links for both the EUT and the reference antenna.

If only one set of linking is used, then the attenuation of the linking can be ignored. The shielding is then the difference between the two received powers.

### G.5 Transmission cross-section

#### G.5.1 General

Another way to evaluate the shielding effectiveness is in terms of the transmission cross-section ( $\sigma_a$ ). The transmission cross-section (in  $\text{m}^2$ ) is defined as:

$$P_{\text{Trans}} = \sigma_a S_{\text{inc}} \quad (\text{G.6})$$

where

$P_{\text{Trans}}$  is the power transmitted through the aperture (in W), and

$S_{\text{inc}}$  is the power flux density of the field incident onto the aperture (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ) [10], [11].

In general, if the incident field is a plane wave, then  $\sigma_a$  will depend on the angle of incidence and the polarization of the wave. When  $\sigma_a$  is measured using reverberation chambers, the resulting  $\sigma_a$  is an isotropic average across all angles of incidence and all polarizations. This is due to the isotropic nature of the environment in the reverberation chamber.

To obtain the transmission cross-section, the data collected in G.3.8 shall be modified. By recording the average received power in G.3.8(3) instead of the maximum received power and calculating the reciprocal of the  $TFVF$  based on average power, the transmission cross section (in  $\text{m}^2$ ) can be calculated using the following formula.

$$\sigma_a = \frac{\lambda^2 \eta_{\text{Rx}} \eta_{\text{Tx}}}{8\pi} \frac{P_{\text{Input}}}{P_{\text{AveRec}}} \frac{\langle P_{\text{Test Fixture}} \rangle}{\langle P_{\text{Ref}} \rangle} \quad (\text{G.7})$$



where

- $\frac{P_{\text{Input}}}{P_{\text{AveRec}}}$  is the reciprocal of  $TFVF$  obtained from G.3.8 (4) and calculated using the average received power instead of maximum received power,
- $\langle P_{\text{Test Fixture}} \rangle$  is the average power received by the antenna inside the test fixture,
- $\langle P_{\text{Ref}} \rangle$  is the average power received by the chamber reference antenna,
- $\eta_{\text{Rx}}$  and  $\eta_{\text{Tx}}$  are the efficiency of the receive (reference) and transmit (test fixture) antennas (dimensionless), and
- $\lambda$  is the wavelength at the frequency of excitation (in m).

### G.5.2 Estimating the shielding effectiveness of an enclosure

The average shielding effectiveness of an electrically large enclosure can be estimated as follows:

$$\langle SE \rangle = \frac{2\pi V}{\sigma_a \lambda Q} \quad (\text{G.8})$$

where

- $V$  and  $Q$  are the volume (in  $\text{m}^3$ ) and quality factor of the enclosure (test fixture), and
- $\lambda$  is the excitation wavelength (in m).

NOTE The  $\langle \rangle$  denote the spatial average taken over all internal points within the enclosure. It is an average over the standing wave pattern of the field inside the cavity.

## G.6 Control of the test set-up

Prior to any measurements, the dynamic range of the test set-up shall be checked using the same linking devices as for the EUT. The dynamic range shall be at least 10 dB greater than the desired shielding.

Prior to any measurements of material shielding, the  $TFVF$  shall be determined. It is recommended that the  $TFVF$  be collected using actual test samples.

Determination of the test fixture insertion loss (G.3.8) may be omitted if the  $Q$  of the test fixture is similar to the  $Q$  of the intended application of the material or gasket being tested. In addition, where testing is performed on multiple items to determine the relative  $SE$ , the test fixture validation can be omitted as well.

Data may be collected at frequencies below the LUF of the test fixture. Such data should be viewed with caution, because measurement uncertainties increase rapidly below the LUF.

NOTE 1 The data collection procedure is one possible sequence of collecting the desired data. Depending on the type of receiver, RF source, and motion control used, many variations are possible that will result in the required data being collected. For example, one can use a spectrum analyser in maximum hold mode for a receiver and set it to record the received signal over a broad frequency range while stepping the chamber input frequency over the same range. If the dwell time at each frequency is such that the fixture tuner makes one revolution for each of the steps required to rotate the chamber tuner one revolution, then the required number of samples will be collected at each frequency.

NOTE 2 Unless the shielding material is non-reciprocal (e.g., magnetized ferrite or semiconductor), the same information can be obtained by transmitting into the test fixture and measuring the amount of RF energy that leaks out of the test fixture.

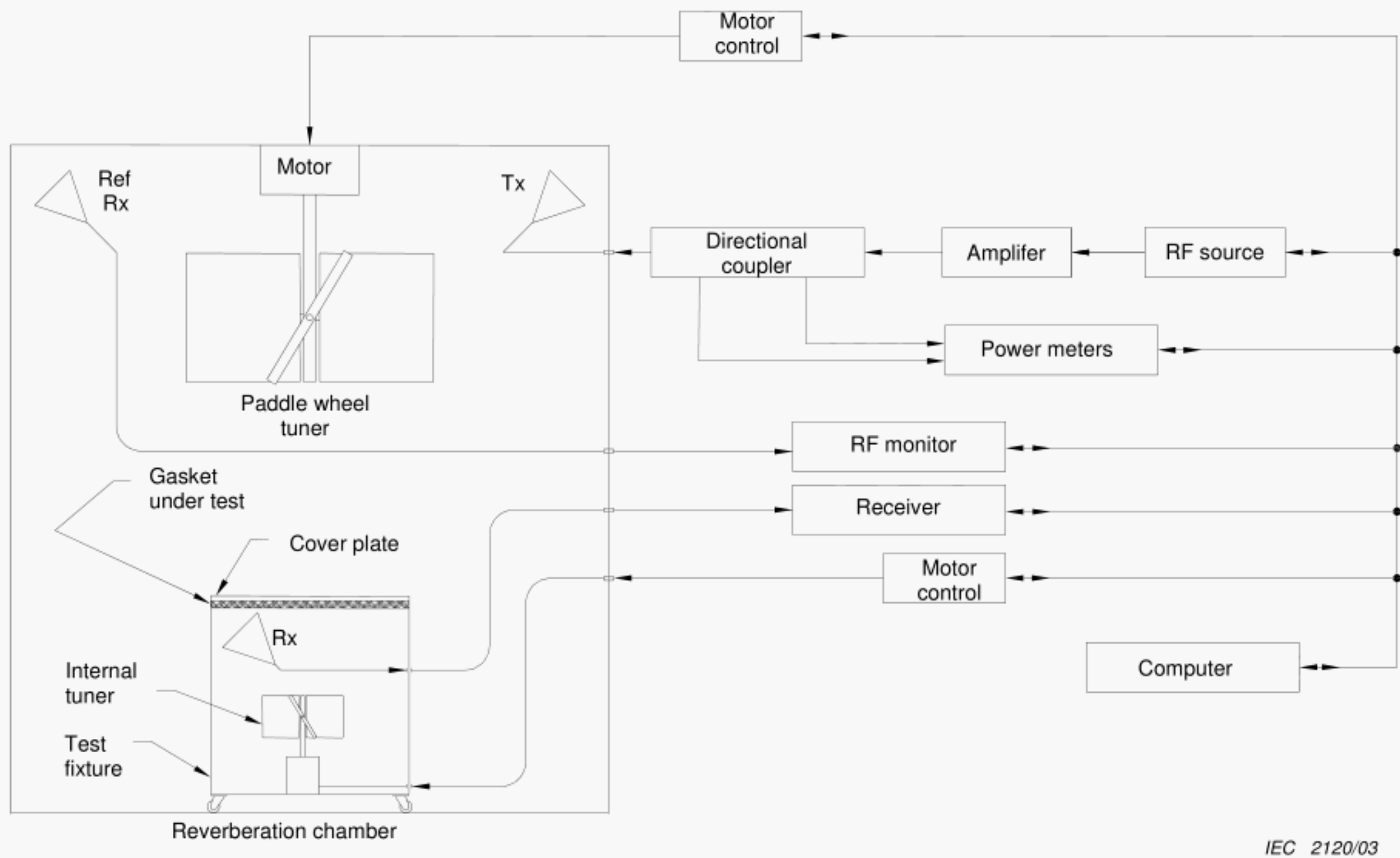


NOTE 3 It is possible to determine the approximate amount of energy absorbed by the material under test by comparing the TFVF with the material in place to the fixture TFVF with a solid aluminium plate in place of the material under test.

## G.7 Reference documents

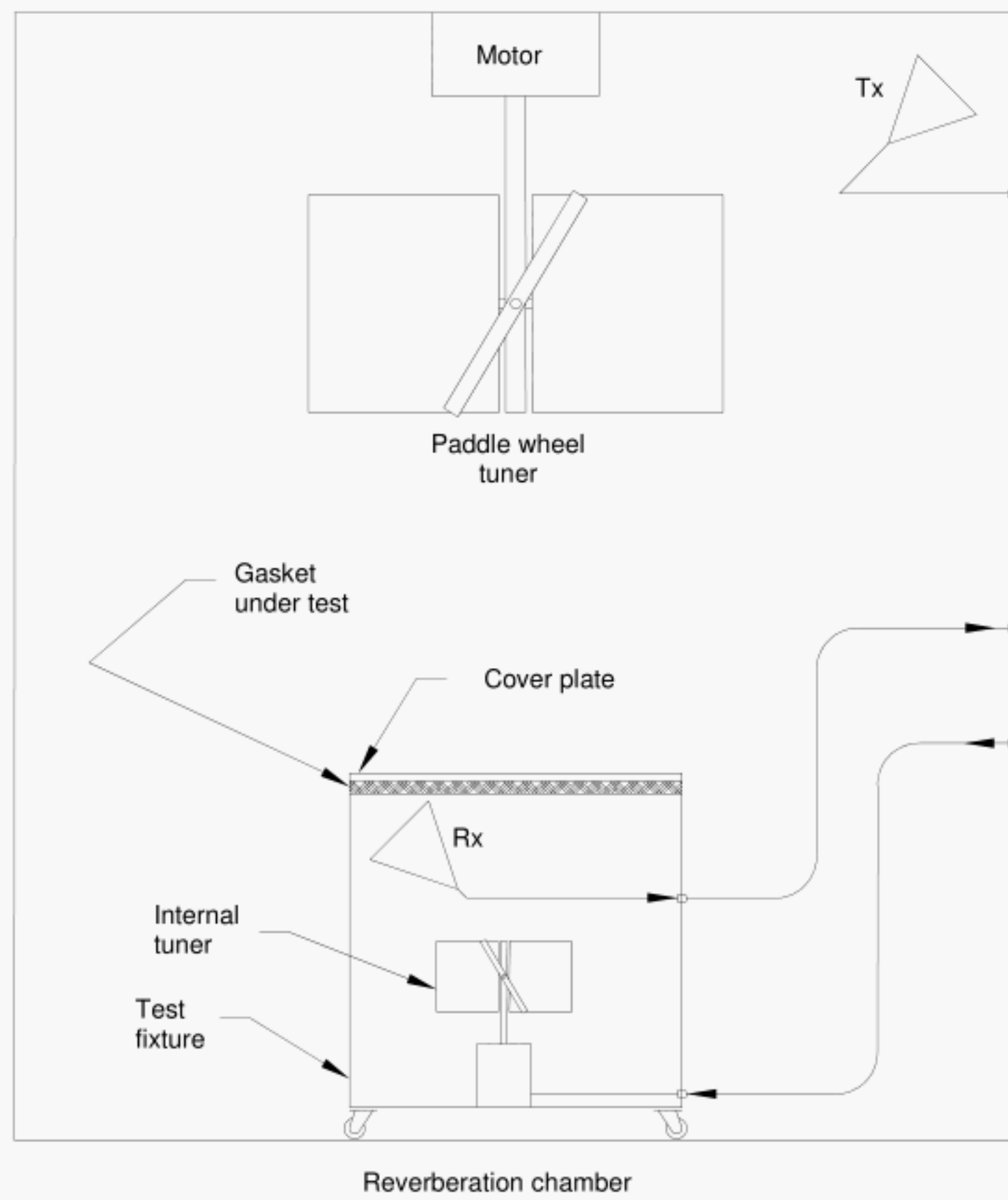
- [1] IEC 61726, Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components – Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method
- [2] IEC 60169-1-3, Radio-frequency connectors – Part 1: General requirements and measuring methods – Section Three – Electrical tests and measuring procedures: Screening effectiveness
- [3] IEC 61000-5-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-7: Installation and mitigation guidelines – Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)
- [4] HATFIELD, MO., Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: A comparison of two approaches, IEEE Trans. EMC, Aug. 1988, vol. 30 no. 3, pp. 229-238
- [5] FREYER, GJ. and HATFIELD, MO., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements – Part I, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp. 139-141
- [6] HATFIELD, MO. and FREYER, GJ., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements – Part II, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp.142-148
- [7] HE, Y., MARVIN, AC., and FLINTOFT, ID., A study of the field statistics in nested frequency-stirred reverberation chambers, 29<sup>th</sup> URSI Gen. Assembly, Chicago, IL, Aug. 2008
- [8] HOLLOWAY, CL., HILL, D., LADBURY, J., KOEPKE, G., and GARZIA, R., Shielding effectiveness measurements of materials in nested reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, vol. 45 no. 1, 2003
- [9] ARNAUT, LR., Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies, IEEE Trans. EMC, Nov. 2001, vol. 43 no. 4, pp. 637-653
- [10] MARTIN, T., BÄCKSTRÖM, M., and LORÉN, J., Transmission cross section of apertures determined by measurements and FDTD simulations, 12th Int. Zürich Symp. Techn. Exhib. EMC, Feb. 18-20, 1997, pp. 245-250
- [11] QUINE, JP., Distortion of radiation pattern for leakage power transmitted through attenuation cover panels and shielding gasket – need for reverberation chamber measurement of total leakage power, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Chicago, Aug. 1994, pp. 285-290
- [12] MIL-STD-285, Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes





IEC 2120/03

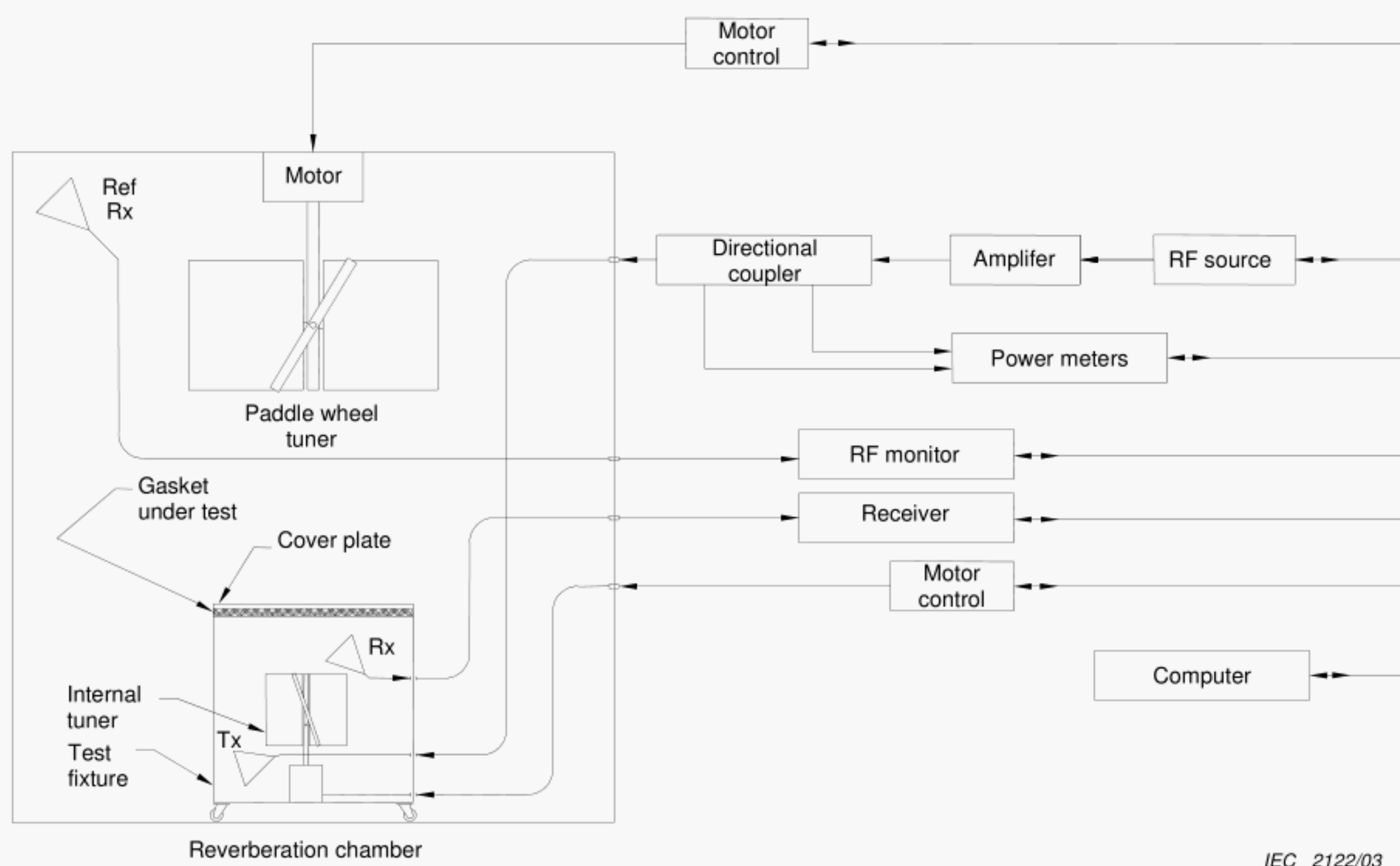
**Figure G.1 – Typical test set-up**



IEC 2121/03

**Figure G.2 – Typical test fixture installation for gasket and/or material testing**





**Figure G.3 – Test fixture configured for validation**



## Annex H (informative)

### Shielding effectiveness measurements of enclosures

#### H.1 Overview

As in radiated immunity testing, there are many test techniques available to evaluate the shielding performance of gaskets, window materials, and other system configurations designed to provide shielding [1]<sup>10</sup>, [2], [3]. Typically, a shielding effectiveness (SE) measurement compares the electromagnetic (EM) environment inside an enclosure with and without the shielding design approach in place. SE test techniques are described in many sources of references, such as MIL-STD-285 [12]. Unfortunately, many SE measurements are noted for their lack of repeatability and facility-to-facility comparability. Some of these discrepancies can be attributed to the test technique while the test article itself causes others. Many factors such as the condition of mating surfaces and torquing of fasteners can markedly affect the repeatability of SE measurements.

For many shielding designs (e.g., gaskets, windows, etc.), reverberation testing uses a "nested chamber" approach (i.e., a reverberation chamber within a reverberation chamber). A receiving antenna and paddle wheel tuner are installed in the test enclosure to detect any RF energy that "leaks" into the enclosure. Readers who are unfamiliar with the use of reverberation chambers for SE measurements should review [3], [4], [5] or [6].

Many factors of a test set-up shall be carefully controlled to achieve repeatability in a SE test. Assuming one can control these factors, the uniformity of the EM environment in a reverberation chamber provides an all-aspect angle SE test with excellent repeatability from facility to facility.

#### H.2 Measurement of EUT shielding effectiveness

The measurement of shielding effectiveness is based on the comparison of the electromagnetic field power outside the EUT to the electromagnetic field power induced into the EUT. The shielding effectiveness *SE* (in dB) is defined as:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{H.1})$$

where

$P_{\text{EUT}}$  is the power coupled to the equipment under test, and

$P_{\text{Ref}}$  is the power coupled to the reference antenna.

#### H.3 Test set-up description

##### H.3.1 General

For testing enclosures it is not required to construct a test fixture to which the item to be evaluated is mounted. The item to be tested is instrumented. Reverberation chamber SE testing uses a "nested chamber" approach (for instance a reverberation chamber inside another reverberation chamber). A receiving antenna and paddle wheel tuner/stirrer are installed in the enclosure to detect any RF energy that "leaks" into the enclosure. The

<sup>10</sup> Figures in square brackets refer to Clause H.6, Reference documents, at the end of this annex.



enclosure shall be at least  $\lambda/4$  from the chamber walls. Enclosures designed for tabletop operation shall be located  $\lambda/4$  from the chamber floor. Floor-standing enclosures shall be supported 10 cm above the floor by a dielectric support.

### H.3.2 Test set-up for enclosures

The size of the enclosure determines the lowest frequency at which usable data can be obtained. For most enclosures, this lowest usable frequency can be estimated by determining the frequency at which the enclosure has about 60 modes. The formula for determining this frequency is listed in H.3.7(1), Equation (H.2). The enclosure can be calibrated by using the procedure from B.1.2 if desired. The enclosure shall be modified by installing a receiving antenna and a mechanical tuner assembly.

### H.3.3 The reverberation chamber

The shielded enclosure shall be fitted with multiple access ports to facilitate connection of the enclosure to the measurement equipment.

### H.3.4 Antennas

The Tx antennas used shall be efficient at the frequencies to be tested. It is most important that the efficiency of the Tx antennas in the enclosure be as high as possible.

The efficiency of the Rx antenna shall be the same for characterising the test enclosure and for collecting the shielding data. It is recommended that the same antenna be used. The efficiency of the Rx antenna is not critical. However, to ensure good dynamic range, it should be as high as possible.

### H.3.5 Test set-up

The essential test equipment and components required for an automated shielding effectiveness measurement are shown in Figures H.1 and H.2. Note that preamplifiers, amplifiers, and other components might also be required to obtain the desired dynamic range.

### H.3.6 Linking devices

Linking devices are usually 50  $\Omega$  coaxial lines having shielding effectiveness at least 10 dB above the desired shielding.

All linking devices shall be characterised for attenuation prior to beginning the test. This includes linking devices for the EUT Rx antenna, Tx antenna(s), and reference antenna.

### H.3.7 Enclosure preparation

Unlike SE testing of gaskets and materials, where the test fixture losses shall be accounted for, the testing of enclosures does not require validation of the enclosure. This is because the losses associated with the enclosure are part of the shielding that the enclosure can be expected to provide. The determination of the frequency range over which accurate data can be obtained shall still be established. Therefore, the lowest usable frequency (LUF), i.e., the lowest frequency at which the enclosure to be tested can be expected to return reasonably accurate data, shall be determined. Prepare the enclosure for testing as follows:

- (1) Determine the lowest usable frequency for the enclosure by calculating the frequency at which it has at least 60 possible modes ( $N = 60$ ) using the following formula (valid for rectangular enclosures [4]; for non-rectangular enclosures see Note 1 in subclause G.3.8):

$$N = \frac{8\pi}{3} abd \frac{f^3}{c^3} - (a + b + d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (\text{H.2})$$



where

$a, b, d$  are the enclosure dimensions ( $L, W, H$ ) (in m),

$c$  is the speed of wave propagation in the enclosure (in m/s), and

$f$  is the frequency (in Hz).

- (2) Configure enclosure for test by installing a Rx antenna and mechanical tuner inside the enclosure. The mechanical tuner should be as large as possible and still maintain a separation distance of  $\lambda/4$  from the receive antenna. Directing the Rx antenna into a corner is desirable. Directing the Rx antenna at the tuner/stirrer is acceptable. Feed points into the enclosure for the Rx antenna linking device and tuner/stirrer power should be well shielded. Shielding of the feed points should be at least 5 dB above the desired shielding effectiveness.
- (3) SE testing is well suited for mode-stirring techniques due to the generally fast response time of the receivers employed. If stirring is used, ensure that the issues in Annex C are adequately addressed. If mode tuning is used, use at least the minimum number of steps outlined in Annex B with  $f_s$  set to the frequency at which the enclosure has 60 possible modes.

### H.3.8 Determining measurement dynamic range

Before performing any testing, the dynamic range of the measurement system should be determined as follows:

- (1) Remove all hatches, doors, etc., necessary to expose the interior of the enclosure to be tested.

NOTE 1 If the enclosure has a large door or other opening that, when opened, results in the interior of the cavity being thoroughly exposed, the removal of access panels, etc. is not necessary.

- (2) For each test frequency, transmit a known power into the chamber Tx antenna (again, validation shall be relative to the antenna terminals) and record the maximum power received by the test enclosure Rx antenna over one rotation of the chamber tuner.

NOTE 2 SE testing is well suited for mode-stirring techniques due to the generally fast response time of the receivers employed. If stirring is used, ensure that the issues in Annex C are adequately addressed. If mode tuning is used, use at least the number of steps used to calibrate the chamber.

- (3) Replace the test enclosure Rx antenna with a well-shielded termination.
- (4) Repeat Step (2).

NOTE 3 The same input power to the chamber should be used or the received power from each data point should be normalized to the chamber input power.

- (5) Replace the test enclosure Rx antenna.
- (6) Determine the dynamic range of the measurement set-up by taking the ratio between the readings recorded in Steps (3) and (5), ensuring that its value is greater than the desired shielding by at least 5 dB, using the following equation.

$$\text{Dynamic Range} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Rx Antenna}}}{P_{\text{Rx Termination}}} \right) \quad (\text{H.3})$$

where

$P_{\text{Rx Antenna}}$  is the power received by the chamber Rx antenna, and

$P_{\text{Rx Termination}}$  is the power received by the test enclosure Rx antenna terminals with the antenna replaced by the termination.



## H.4 Measurement procedure

### H.4.1 General

Perform the testing using mode-tuned or mode-stirred procedures. For mode-tuned operation, the chamber tuner shall use at least the same number of steps as used in the chamber validation. The enclosure tuner shall use the same number of steps as used in H.3.8 (3). When using mode-tuned procedures, both tuners should be rotated in a manner that results in the enclosure tuner making one complete revolution for each step of the chamber tuner. When using mode-stirred procedures, the maximum stirrer rotation rate shall ensure that the EUT and the associated measurement equipment is exposed to at least the number of samples that would be encountered using mode-tuned techniques. Ensure that for either procedure the measurement equipment is allowed to sample the field level for the appropriate dwell time. This is particularly important for mode-stirred operation.

NOTE It is often convenient to use a combination of tuning and stirring. The chamber tuner is rotated one complete rotation using the same number of steps used in the chamber validation while the enclosure stirrer is rotated continuously. For each position (step) of the chamber tuner the enclosure tuner rotates one complete revolution. The rotation rate of the test enclosure tuner is the same as used in H.3.8 (3). This ensures that the sampling rate of the measurement equipment is such that the required number of samples is obtained over each rotation of the test enclosure tuner. For guidance on the maximum stirring rate, see Annex C.

The measured parameter is the maximum received power. For measurements based on the maximum received power, the dynamic range of the measurement system should be at least 5 dB more than the desired shielding effectiveness.

### H.4.2 Measurement of the EUT

The procedure is the following:

- (1) Connect the RF source to the chamber (through an amplifier if necessary).
- (2) Connect the measurement equipment to the test enclosure Rx antenna (through a pre-amplifier if necessary).
- (3) Connect the chamber reference antenna to the chamber monitoring equipment (through an attenuator if necessary).
- (4) Configure the enclosure for test.
- (5) Start the chamber and enclosure tuner(s)/stirrer(s) in motion.
- (6) Inject the first test frequency into the chamber at a fixed input power.
- (7) Record the maximum reading from the chamber monitoring equipment and the EUT monitoring equipment over one complete cycle of the tuner(s)/stirrer(s).
- (8) Repeat Step (7) for all test frequencies.
- (9) Install a known shield material (aluminium or copper foil or tape) over areas of suspected leakage. Do NOT apply additional shielding to the feed points or any other area of the enclosure that is not a part of the evaluation.
- (10) Perform a leakage test by repeating Steps (5) through (9).

NOTE The same input power to the chamber should be used for both data collection and leak test. If a different input power is used then the all data should be normalized to the chamber input power prior to calculating the SE.

- (11) The shielding effectiveness can then be calculated using the following formula, by taking into account the attenuation of the links for both the EUT and reference antenna:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{H.4})$$

where

$P_{\text{EUT}}$  is the maximum power received by the enclosure reference antenna in Step (7) (corrected for link loss), and



$P_{\text{Ref}}$  is the power received by the chamber Rx antenna in Step (7) (corrected for link loss).

- (12) The “leak” test in Step (10) ensures that the measured leakage has entered through an area of the enclosure that was part of the evaluation, and is not a result of a modification to the enclosure such as the feed points for the tuner power and receive lines. Determine the SE of this configuration using Equation (H.4) by substituting the received powers from Step (10). If the SE obtained from Step (10) is not at least 5 dB more than the SE obtained from the unmodified enclosure, then the SE is considered to be greater than or equal to the SE of the unmodified enclosure. If higher SE is desired, then more investigations as to the points of entry into the measurement system are warranted.

#### H.4.3 Alternative method of measurement of the EUT

If two sets of measurement equipment are not available, then the measurement equipment may be connected to the EUT and the reference antenna one at a time.

If two sets of linking are used, then the shielding effectiveness shall be calculated by taking into account the attenuation of the links for both the EUT and the reference antenna.

If only one set of linking is used, then the attenuation of the linking can be ignored. The shielding is then the difference between the two received powers.

#### H.5 Control of the test set-up

Prior to any measurements, the dynamic range of the test set-up shall be checked using the same linking devices as for the EUT. The dynamic range shall be at least 5 dB greater than the desired shielding effectiveness.

Data may be collected at frequencies below the LUF of the enclosure. Such data should be viewed with caution, because measurement uncertainties then increase rapidly below the LUF.

NOTE The data collection procedure is one possible sequence of collecting the desired data. Depending on the type of receiver, RF source, and motion control used, many variations are possible that will result in the required data being collected. For example, one can use a spectrum analyser in maximum hold mode for a receiver and set it to record the received signal over a broad frequency range while stepping the chamber input frequency over the same range. If the dwell time at each frequency is such that the enclosure tuner makes one revolution for each of the steps required to rotate the chamber tuner one revolution, then the required number of samples will be collected at each frequency.

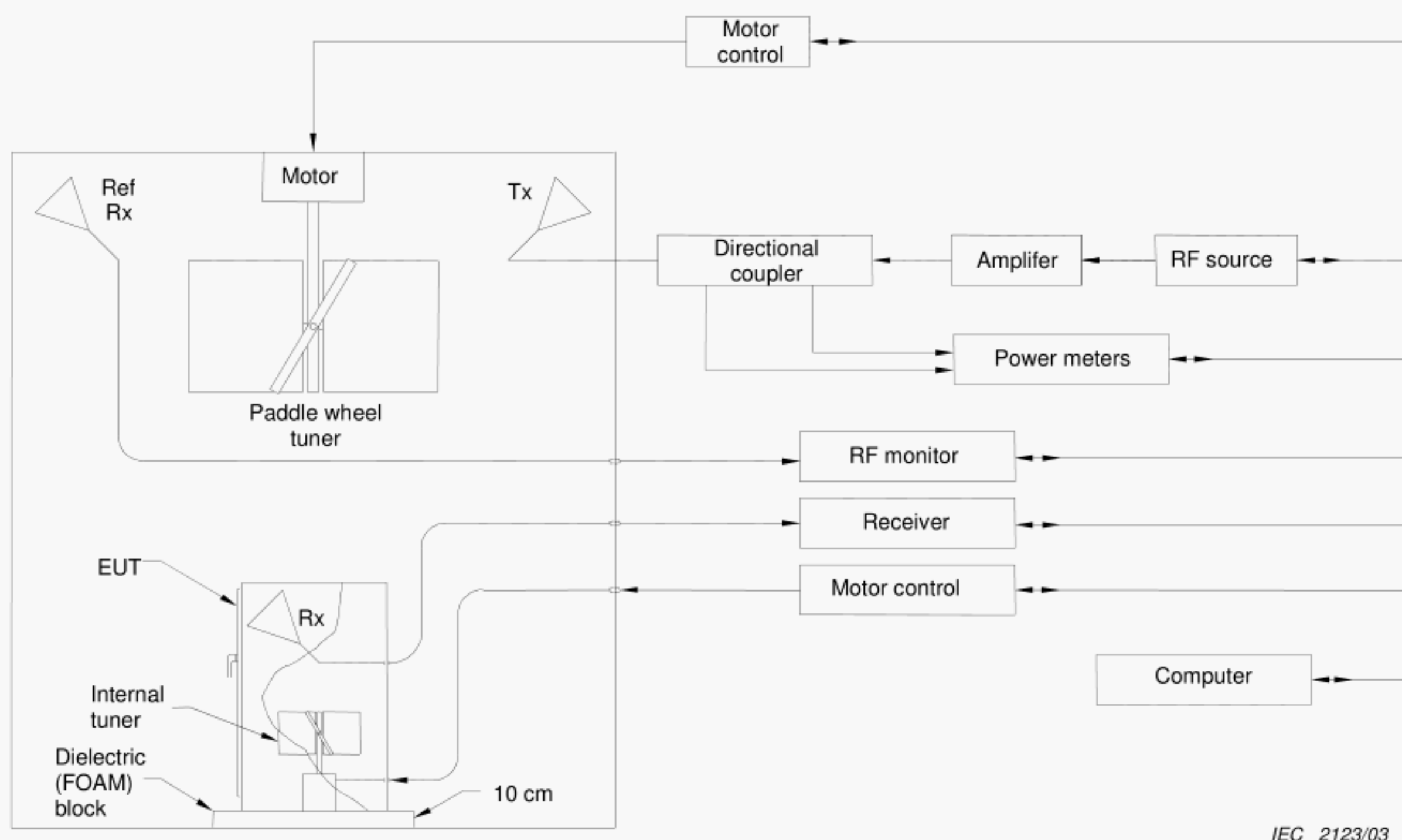
#### H.6 Reference documents

- [1] IEC 61726, Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components – Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method
- [2] IEC 60169-1-3, Radio-frequency connectors – Part 1: General requirements and measuring methods – Section Three – Electrical tests and measuring procedures: Screening effectiveness
- [3] IEC 61000-5-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-7: Installation and mitigation guidelines – Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)
- [4] HATFIELD, MO., Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches, IEEE Trans. EMC, Aug. 1988, vol. 30 no. 3, pp. 229-238



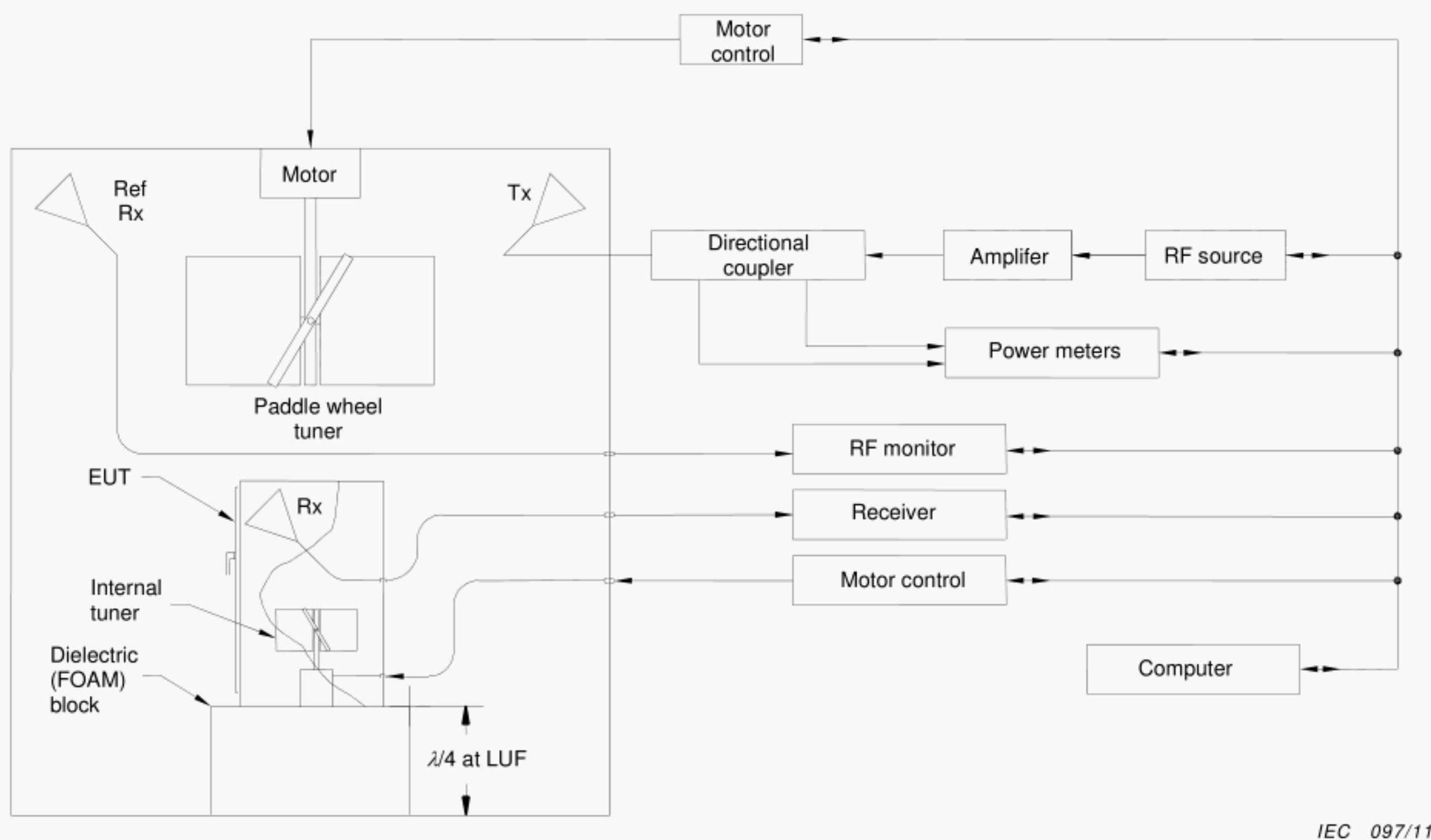
- [5] FREYER, GJ. and HATFIELD, MO., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements – Part I, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp. 139-141
- [6] HE, Y., MARVIN, AC., and FLINTOFT, ID., A study of the field statistics in nested frequency-stirred reverberation chambers, Proc. 29<sup>th</sup> URSI General Assembly, Chicago, IL, Aug. 2008
- [7] HATFIELD, MO. and FREYER, GJ., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements – Part II, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp.142-148





IEC 2123/03

**Figure H.1 – Typical test enclosure installation for floor mounted enclosure testing**



IEC 097/11

**Figure H.2 – Typical test enclosure installation for bench mounted enclosure testing**



## Annex I (informative)

### Antenna efficiency measurements

#### I.1 Antenna efficiency

Antenna efficiency is defined as the ratio of the total power radiated by an antenna to the net power accepted by the antenna from the connected transmitter [1]<sup>11</sup>.

$$\eta_{\text{Antenna}} = \frac{P_{\text{radiated by antenna}}}{P_{\text{Power accepted by antenna from transmitter}}} \quad (\text{I.1})$$

In practical terms, antenna efficiency is defined as the ratio of RF power radiated by the antenna to the amount of RF power delivered to an antenna's terminals.

$$\eta_{\text{Antenna}} = \frac{P_{\text{radiated by the antenna}}}{P_{\text{Input to the antenna terminals}}} \quad (\text{I.2})$$

By reciprocity, the receiving efficiency is the same as the radiation efficiency. The antenna efficiency can be expressed in terms of radiation resistance and loss resistance [2].

From the above definitions, we see that no antenna is 100 % efficient. All antennas will have some loss. These losses can be attributed to ohmic losses, i.e., conversion losses (conducted to radiated/radiated to conducted), transition losses (coax adaptors), etc. Note that impedance mismatch is considered as a separate characteristic of an antenna and is not part of the efficiency of the antenna.

Although efficiency is a real characteristic of an antenna, antenna efficiency is normally not measured during routine antenna characterizations. In fact, the efficiency of an antenna is not easily measured, although it can be computed from numerical simulation of the current distribution across the antenna. Most good antennas are efficient. A typical commercial dual ridged horn for example converts on the order of 95 % of the RF energy delivered to its terminals to radiated field, whereas a log periodic antenna on the other hand converts on the order of 75 % of the RF energy delivered to its terminals into radiated field [3].

When performing measurements in a reverberation chamber, it is necessary to account for the antenna efficiency in order to make accurate estimations of chamber characteristics such as chamber quality factor  $Q$  and the chamber time constant  $\tau$ . The values of 95 % and 75 % used in this specification are based on the experience of the National Institute of Standards and Technology (NIST), Electromagnetic Fields Division, Boulder, Colorado, USA. Since actual values for efficiency are not supplied with manufacturers' data, it is necessary to make approximations in order to improve the accuracy of characterizing the chamber [3, 4]. The stated efficiencies are based on measurements made by NIST using several horn and log periodic antennas, all of which consistently demonstrated efficiencies near the stated values.

NOTE Antenna mismatch depends, among other factors, on the wave impedance of the environment, and is not a property of the antenna itself. The mismatch is not included in Equation I.2 and should be taken into account separately.

<sup>11</sup> Figures in square brackets refer to Clause I.3, Reference documents, at the end of this annex.



## **I.2 Measuring antenna efficiency**

The reverberation chamber is perhaps one of the best ways to experimentally characterize the relative efficiency of an antenna [5]. By properly characterizing a reverberation chamber using a pair of well characterized antennas, and substituting an antenna of unknown efficiency, the relative efficiency of the unknown antenna can be determined. This type of measurement would require a thorough test procedure in order to resolve efficiency to within a few percent. Such a procedure would generally require a very large number of measurements in order to get the required accuracy.

## **I.3 Reference documents**

- [1] IEEE standard definitions of terms for antennas, IEEE Std. 145-1993, 21 Jun. 1993.
- [2] NEWMAN, EH., BOHLEY, P., and WALTER, CH., Two methods for the measurement of antenna efficiency, IEEE Trans. Antennas Propag., Jul. 1975, vol. 23 no. 4, pp. 457-461.
- [3] LADBURY, JM., KOEPKE, GH., and CAMELL, DG., Evaluation of the NASA Langley Research Center mode-stirred chamber facility, National Institute for Standards and Technology (US), Technical Note 1508, Jan. 1999.
- [4] JOHNSON, RH. and McRORY, JG., An improved small antenna radiation-efficiency measurement method IEEE, Antennas Propag. Mag., Oct. 1998, vol. 40 no. 5, pp. 40-48
- [5] ROSENGREN, K., KILDAL, P.-S., CARLSSON, C., and CARLSSON J., Characterization of antennas for mobile and wireless terminals in reverberation chambers: improved accuracy by platform stirring, Microw. Opt. Techn. Lett., 2001, vol. 130, p. 6.



## Annex J (informative)

### Direct evaluation of reverberation performance using field anisotropy and field inhomogeneity coefficients

#### J.1 Overview

**J.1.1** In the practice of validation and testing in reverberation chambers, an important issue is how ‘closely’ the actual chamber resembles an ideal reverberation chamber, at the measurement frequency. In order to quantify this actual reverberation performance, one can analyze the tuner data, for example, using an appropriate statistical goodness-of-fit test. Such a hypothesis test evaluates the mismatch between the measured and the theoretical (ideal) distribution functions of field or power density, at a predefined acceptance level. This level may not have equal significance for different types of goodness-of-fit tests [1]<sup>12</sup>, [2], [3] and, possibly for different chambers. Furthermore, statistics of individual field components only provide indirect information on the quantities of real interest for reverberant fields, viz. polarization uniformity (field isotropy) or spatial uniformity (field homogeneity). A goodness-of-fit test thus gives a mainly qualitative indication of the stirring performance of that chamber, and the result is often a non-quantified statement of ‘good’ or ‘bad’ reverberation performance.

**J.1.2** An alternative but quantitative approach is the use of deterministic metrics for stirring performance, viz. using planar and total field anisotropy coefficients, as discussed below, which express the degree of field isotropy and field homogeneity directly, and do not require the use of statistical distributions of individual rectangular components for the field or power density. This is a relatively quick way to assess tuner and chamber performance.

#### J.2 Field anisotropy coefficients

##### J.2.1 Definitions

The planar and total field anisotropy coefficients  $A_{\alpha\beta}$  and  $A_{\text{tot}}$ , respectively, are defined via their stir averages as [4], [5], [6]:

$$\langle A_{\alpha\beta} \rangle = \left\langle \frac{(|E_\alpha|^2 / P_i) - (|E_\beta|^2 / P_i)}{(|E_\alpha|^2 / P_i) + (|E_\beta|^2 / P_i)} \right\rangle = \left\langle \frac{(P_\alpha / P_i) - (P_\beta / P_i)}{(P_\alpha / P_i) + (P_\beta / P_i)} \right\rangle \quad (\text{J.1})$$

$$\langle A_{\text{tot}} \rangle = \left\langle \sqrt{[A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2] / 3} \right\rangle \quad (\text{J.2})$$

where

$|E_{\alpha,\beta}|$  and  $P_{\alpha,\beta}$  represent the measured received field strength and power density, respectively, of the arbitrary rectangular component  $\alpha$  or  $\beta = x, y, z$  for a given stirrer state (position)  $\tau$ ,

<sup>12</sup> Figures in square brackets refer to Clause J.6, Reference documents, at the end of this annex.



- $P_i$  is the net (i.e., forward minus reflected) input power injected into the chamber at  $\tau$  for measured  $\alpha$  or  $\beta$ , and
- $\langle \cdot \rangle$  denotes stir (i.e., ensemble) averaging over all  $\tau$ , as defined in B1.2(10).

The definitions for Equations (J.1) and (J.2) are not affected by  $\langle P_i \rangle$ , but they do depend on the variations of  $P_i$  with  $\tau$ . Physically, the definition of  $A_{\text{tot}}$  as a root-mean-square average of the individual  $A_{\alpha\beta}$  gives, in a single parameter, a measure for the bias of the average direction of polarization of the electric field that exists when this average direction is viewed in (projected onto) three orthogonal planes.

## J.2.2 Evaluation procedure

### J.2.2.1 The procedure is the following:

- (1) The required minimum number of uncorrelated stirrer states  $N$  is decided upon first, as outlined in Clause A.3. This is to be done in accordance with the user's specifications for the level of maximum acceptable *uncertainty* of the characterization of the field anisotropy coefficients.

NOTE 1 For 'good' stirring quality,  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  is of the same order as the magnitude of its associated standard deviation. The latter corresponds to the mean values for 'good' stirring quality listed in Table J.1 (this table serves as a 'good practice guide' for chamber and stirrer design). It is recommended to choose  $N$  as large as 100 or more for evaluation of a single chamber (at least  $N = 30$  for obtaining meaningful results), and  $N = 300$  for chamber inter comparisons. The minimum value for  $N$  may be determined *a posteriori* from a large sample by following the procedure outlined in J.2.4.1. A note of caution: in general, the lower the chosen value of  $N$ , the less meaningful the results for  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , particularly when  $N < 30$ .

- (2) The field magnitudes  $|E_\alpha(\tau)|$  or power densities  $P_\alpha(\tau)$ , with  $\alpha = x, y, z$ , are measured for the  $N$  stirrer states  $\tau$ , the selected frequencies  $f$  and receiver antenna locations  $r$  inside the chamber.

NOTE 2 The measurement procedures and criteria are outlined in B.1.2 Steps (1) to (8), except that *all* amplitude values (measured for each  $\tau$ ) are now being recorded; not just the maximum and average values. For three-axis field probes, the individual readings of the probe elements (dipoles)  $x, y, z$  should be used. For dipole, horn antenna or waveguide measurements, three orthogonal orientations of the aperture are generated by re-orienting the antenna or waveguide between measurements. For each orientation, the aperture should be centered around the same centre point  $r$ .

- (3) For increased accuracy,  $P_i$  shall be measured for each different stirrer state; otherwise an average value across at least 10 uncorrelated stirrer states shall be taken to obtain a nominal average value  $\langle P_i \rangle$  to replace  $P_i$ . The measurement of  $P_i$  shall be repeated for different frequencies and antenna locations.

NOTE 3 Where measurements of  $P_i(\tau)$  are not performed, an estimate for  $\langle P_i \rangle$  should be stated together with the final listing of values for  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ . The significance of  $P_i$  in Equations (J.1) and (J.2) decreases for increasing reverberation quality.

- (4) For each  $\tau$  state and fixed frequency and antenna location, calculate the coefficients:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{(|E_\alpha(\tau)|^2 / P_i) - (|E_\beta(\tau)|^2 / P_i)}{(|E_\alpha(\tau)|^2 / P_i) + (|E_\beta(\tau)|^2 / P_i)} \quad \text{or} \quad A_{\alpha\beta} = \frac{(P_\alpha(\tau) / P_i) - (P_\beta(\tau) / P_i)}{(P_\alpha(\tau) / P_i) + (P_\beta(\tau) / P_i)}, \quad (\text{J.3})$$

and

$$A_{\text{tot}} = \sqrt{[A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2] / 3} \quad (\text{J.4})$$

where  $P_i$  denotes  $P_i(\tau)$  or  $\langle P_i \rangle$ , in accordance with Step (3).

- (5) The stir-averaged, i.e.,  $\tau$ -averaged planar and total field anisotropies  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  are calculated as in Equations (J.1) and (J.2), at the chosen frequency and antenna location.
- (6) Repeat Steps (2) to (5) for each frequency of interest.
- (7) Repeat Steps (2) to (5) for each antenna location of interest. A volumetric average value shall be stated additionally, from calculation of the arithmetic mean of the individual stir averages of  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  over the three or eight antenna or field probe locations, for each frequency, in accordance with the procedure in B.1.2 (10) (b).



The above procedure is for mode-tuned operation, but can also be used for mode-stirred operation, provided the considerations of Annex C are taken into account. Where stir averaging is considerable, inverse local averaging in the time (stir) domain shall be applied first [5], [7], [8] (see also J.2.2.2 and J.5.2).

**J.2.2.2** Where possible, measurements shall be made with electrically small antennas or field probes (typical length less than one third of a wavelength), because local averaging affects the measured field variations (reverberation performance) as compared to the physical variations. Alternatively, the effect of the spatial averaging by the sensor on the measured values of  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  shall be accounted for by re-scaling of the measured values to idealized point values.

### J.2.3 Distributions

**J.2.3.1** The comparison between theoretical and measured distributions of  $A_{\alpha\beta}$  and  $A_{\text{tot}}$  is optional, providing a mainly qualitative measure between ideal and realistic field isotropy and homogeneity. The theoretical and measured distributions of  $A_{\alpha\beta}$  and  $A_{\text{tot}}$  (see J.5.1) converge according to a similar pattern as the corresponding distributions of the more fundamental field magnitude or power density, but are more practically useful.

**J.2.3.2** Figure J.1 shows typical cumulative distribution functions (CDFs) for the  $A_{\alpha\beta}$  and  $A_{\text{tot}}$  in a well-stirred reverberation chamber. Although the individual  $A_{\alpha\beta}$  are close to the ideal theoretical characteristics,  $A_{\text{tot}}$  is more sensitive to chamber imperfections. Figure J.2 shows corresponding distributions for tuner data taken from a relatively poorly stirred chamber.

### J.2.4 Dependence on sample size

**J.2.4.1** In an ideal mode-stirred reverberation chamber, the values of  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  tend to zero as the number of uncorrelated stirrer states becomes arbitrarily large. In poorly stirred chambers,  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle \approx A_{\alpha\beta}$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle \approx A_{\text{tot}}$  for all stirrer states  $\tau$  and, in the mean,  $\text{std}(A_{\alpha\beta}) \ll \langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\text{std}(A_{\text{tot}}) \ll \langle A_{\text{tot}} \rangle$ , where  $\text{std}(\cdot)$  is the standard deviation with respect to  $\tau$ . In particular, a spurious ‘null’ for  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ , caused by an improper choice of  $\alpha$  and  $\beta$  such that  $|E_\alpha| \approx |E_\beta|$  for all  $\tau$ , may then exceptionally occur, or even  $\langle A_{\text{tot}} \rangle \approx A_{\text{tot}} \approx 0$  for a particular choice of  $\alpha, \beta$  and  $\gamma$  such that  $|E_\alpha| \approx |E_\beta| \approx |E_\gamma|$  for all  $\tau$ . This corresponds to the singular case where the direction of field polarization is fixed and is exactly at equal angles with the directions  $o\alpha$ ,  $o\beta$ , and  $o\gamma$  for all stirrer states. In such cases,  $\text{std}(A_{\alpha\beta}) \approx \langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\text{std}(A_{\text{tot}}) \approx \langle A_{\text{tot}} \rangle$ , as for the case of a well-stirred chamber. Therefore, additional information is then needed to detect such a case. Therefore, if  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  or  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  is below  $-10$  dB, a second measurement is made for different orientations of all three  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  for the sensor(s). Spurious ‘nulls’ can more easily be detected by calculating  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  for various sub-samples of size  $M$  ( $\leq N$ ), taken from the original stirrer sequence, and analyzing  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  as a function of  $M$ . A spurious ‘null’ for  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  then shows up as a value that does not decrease, in the mean, as a function of increasing  $M$ . In such case,  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  should be re-assigned the value one, corresponding to a purely anisotropic field.

**J.2.4.2** Figure J.3 shows typical plots of  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , together with absolute values of their standard deviation obtained using bootstrapping and running averages, as a function of sample size. Their values are seen to decrease, in the mean, with increasing values of  $M$ . Reasonable values for  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  of the order of  $-10$  dB,  $-15$  dB, and  $-20$  dB at  $N = 300$  may be considered as ‘moderate,’ ‘good,’ and ‘excellent’ in most applications, respectively. The additional stir effort, i.e., the investment required to reduce low values  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  still further by increasing  $N$ , tends to increase exponentially and should be considered carefully.

An appropriate minimum sample size may be selected as the minimum value of  $M$  for which the  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  remain within a chosen confidence interval for these statistics. Note that in Figure J.3, excursions of  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  or  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  above the level defined by one standard deviation for  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  or  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  are much more severe at the low- $M$  end as opposed to the high- $M$  end because of the logarithmic scale. In this example, the minimum number of stirrer states is about 10 when the uncertainty level is chosen to be one standard deviation.



**J.2.4.3** For the purpose of intercomparison of chambers or stirring techniques, one lists the expression for a fitting curve or, alternatively, selected values for the envelopes of  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  at  $N = 10, 30, 100, 300$ , etc. equivalent independent sample points. The number of equivalent independent sample points  $N$  can be defined by the  $\rho^{-1}(e^{-1})$  decorrelation criterion, i.e., corresponding to the largest sub-sample  $N$  from  $M$  for which  $|\rho(\tau \neq 0)| \leq 1/e$  for the data autocorrelation function  $\rho(\tau)$  of the measured field magnitude or power density. By not removing this data autocorrelation, i.e., allowing for denser sub-sampling, the standard deviation on  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  can be reduced, but the mean values themselves remain unaffected.

Table J.1 lists values for  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  that define a threshold region for ‘medium’ and ‘good’ stirring performance. The point of note is that for  $N \leq 10$ , the mean and standard deviation of the field anisotropy coefficients always remain relatively high, regardless of the stirring performance for larger  $N$ .

**J.2.4.4** In cases where no three orthogonal directions for the measured field strength or power density can be evaluated individually, at a single location inside the chamber, only one planar field anisotropy coefficient may be evaluated from two measurements obtained for mutually perpendicular directions of the receiving sensor. Care shall be exercised to avoid spurious ‘nulls’, as explained in J.2.4.1.

### J.3 Field inhomogeneity coefficients

#### J.3.1 Definitions

Similar coefficients are defined for the field inhomogeneity. One convenient choice for such coefficients, which define the statistical inhomogeneity for the polarization direction  $\alpha = x, y, z$  or for the total field ( $\alpha = t$ ) between two cavity locations  $r_1$  and  $r_2$  is:

$$\langle I_{\alpha}(r_1, r_2) \rangle = \left\langle \frac{(|E_{\alpha}(r_1)|^2 / P_i) - (|E_{\alpha}(r_2)|^2 / P_i)}{(|E_{\alpha}(r_1)|^2 / P_i) + (|E_{\alpha}(r_2)|^2 / P_i)} \right\rangle = \left\langle \frac{(P_{\alpha}(r_1) / P_i) - (P_{\alpha}(r_2) / P_i)}{(P_{\alpha}(r_1) / P_i) + (P_{\alpha}(r_2) / P_i)} \right\rangle \quad (\text{J.5})$$

$$\langle I_{\text{tot}}(r_1, r_2) \rangle = \left\langle \sqrt{[I_x^2 + I_y^2 + I_z^2] / 3} \right\rangle \quad (\text{J.6})$$

#### J.3.2 Evaluation procedure

In general, the same procedures and comments as in J.2.2 apply.

The fluctuations of  $P_i$  for a given state are usually much smaller when moving a sensor into two different locations as compared to the fluctuations observed for a given chamber location and varying stirrer states (see J.2.2.1). In the case of multiple sensors, these spatial fluctuations of  $P_i$  are absent.

Care should be taken to avoid selecting locations  $r_1$  and  $r_2$  that are separated by an integral number of half wavelengths for a continuous wave (CW) excitation signal, or excessively small distances much smaller than this wavelength for which the fields are highly correlated. A minimum distance corresponding to one wavelength is recommended. The procedure may be repeated for multiple locations from which an average value can then be deduced (see Annex B).

#### J.3.3 Distributions

The range and distribution of  $I_{\alpha}$  and  $I_{\text{tot}}$  are comparable to those for  $A_{\alpha\beta}$  and  $A_{\text{tot}}$  (see J.2.2).



### J.3.4 Dependence on sample size

Similar considerations as for  $A_{\alpha\beta}$  and  $A_{\text{tot}}$  apply (see J.2.4).

## J.4 Field anisotropy versus field inhomogeneity

It is usually sufficient to investigate either  $A_{\alpha\beta}$ ,  $A_{\text{tot}}$  or  $I_{\alpha}$ ,  $I_{\text{tot}}$  since field anisotropy and field homogeneity coefficients are highly correlated statistics [4]. The distributions of  $I_{\alpha}$ ,  $I_{\text{tot}}$ , however, are usually more sensitive to mode-stirring imperfections. It can be shown that the statistical isotropy implies statistical homogeneity, but the converse is not necessarily true. Therefore, assessment of field anisotropy is the more stringent test of the two.

## J.5 Extensions

### J.5.1 Distribution of $A_{\alpha\beta}$

The point-wise planar field anisotropy coefficients  $A_{\alpha\beta}$  are self-normalized quantities, taking values between  $-1$  and  $+1$  for each stirrer state, irrespective of the value of  $P_i$ . For perfect reverberation conditions (i.e., ideal statistical field isotropy), the random variable  $A_{\alpha\beta}$  can be shown to exhibit a uniform (rectangular) distribution, whose theoretical cumulative distribution function (CDF) is given by:

$$F_{A_{\alpha\beta}}(a_{\alpha\beta}) = \frac{(1 + a_{\alpha\beta})}{2} \quad (\text{J.7})$$

i.e., a straight line with unit slope. If the measured CDF is predominantly below or above the theoretical CDF then this is indicative of a bias in the statistical field polarization towards the direction  $\alpha$  or  $\beta$  in the  $(o\alpha, o\beta)$  plane, respectively. The maximum distance  $D_N$  between the measured and theoretical CDFs (Kolmogorov—Smirnov statistic) serves as an indirect measure for the field anisotropy [1].

### J.5.2 Minimum number of samples

To determine the number of stirrer positions (sample size) required to obtain an a priori predetermined level of field anisotropy, one repeats the above procedure for different numbers of stirrer states (sample sizes)  $M$  and one plots the corresponding  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  as a function of  $M$ . This can be done simply by taking a subset of  $M$  data points from a single large tuner sweep. One determines the envelope  $X'$  of the measured  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  and  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  from:

$$X'(\tau_i) = \sqrt{X^2(\tau_i) + [H(X(\tau_i))]^2} \quad (\text{J.8})$$

where  $X$  represents  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  or  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , with

$$H(X(\tau_i)) = \pi^{-1} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} \left[ \frac{X(\tau_i - \tau_j)}{\tau_j} \right] \Delta \tau \quad (\text{J.9})$$

Alternatively, one may apply a simpler local moving averaging filter to the measured sample, where averaging is across a length not exceeding 3 % of the maximum length of the stirrer sequence, i.e., replacing the original sequence  $X(\tau_i)$  by:

$$X'(\tau_i) = L^{-1} \sum_{j=i-L/2}^{i+L/2} X(\tau_j) \quad (\text{J.10})$$

with  $L/M \leq 0,03$ .



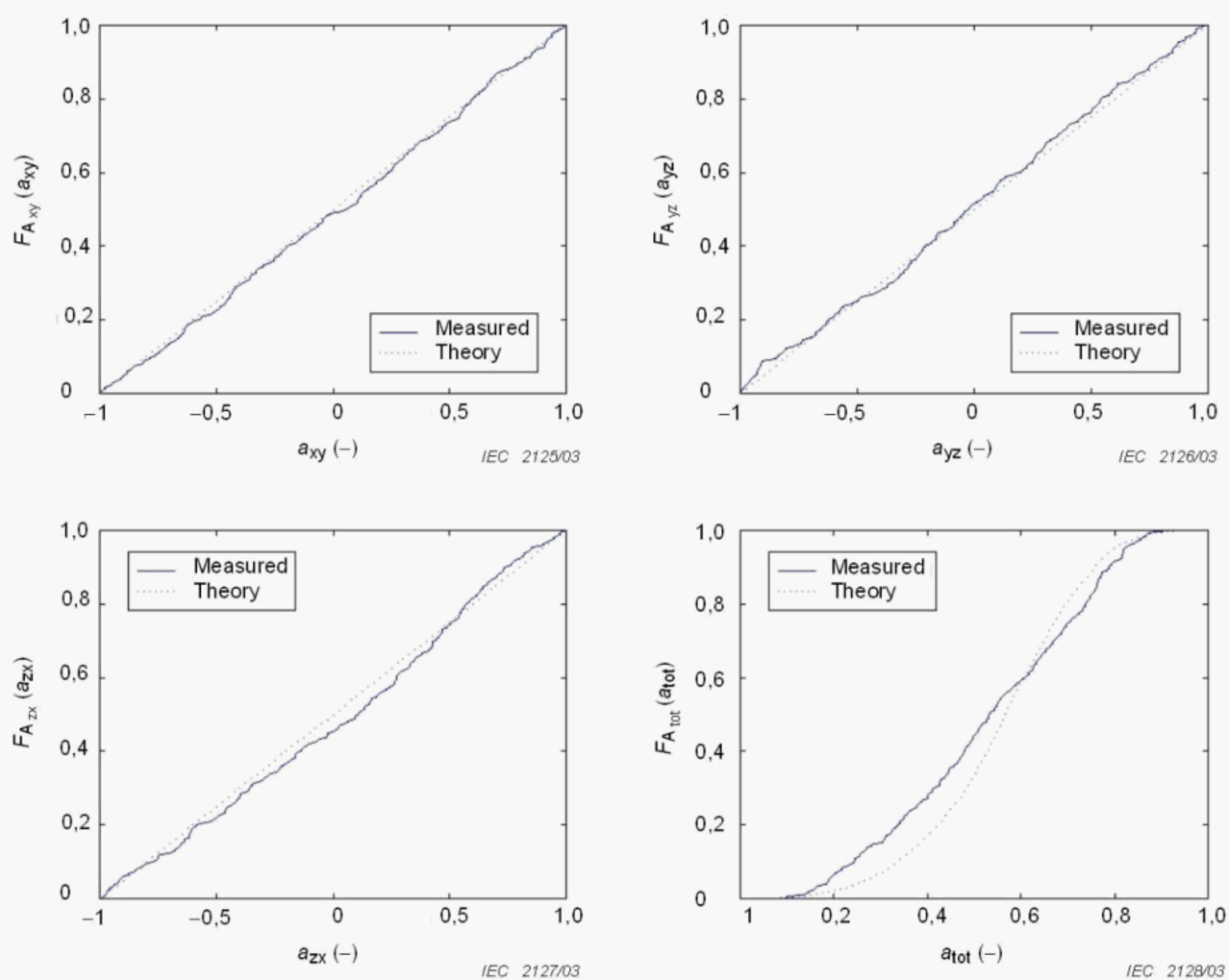
**Table J.1 – Typical values for total field anisotropy coefficients  
for ‘medium’ and ‘good’ reverberation quality**

	$N = 10$	$N = 30$	$N = 100$	$N = 300$
‘Medium’ stirring quality	–2,5 dB	–5 dB	–7,5 dB	–10 dB
‘Good’ stirring quality	–5 dB	–10 dB	–12,5 dB	–15 dB

## J.6 Reference documents

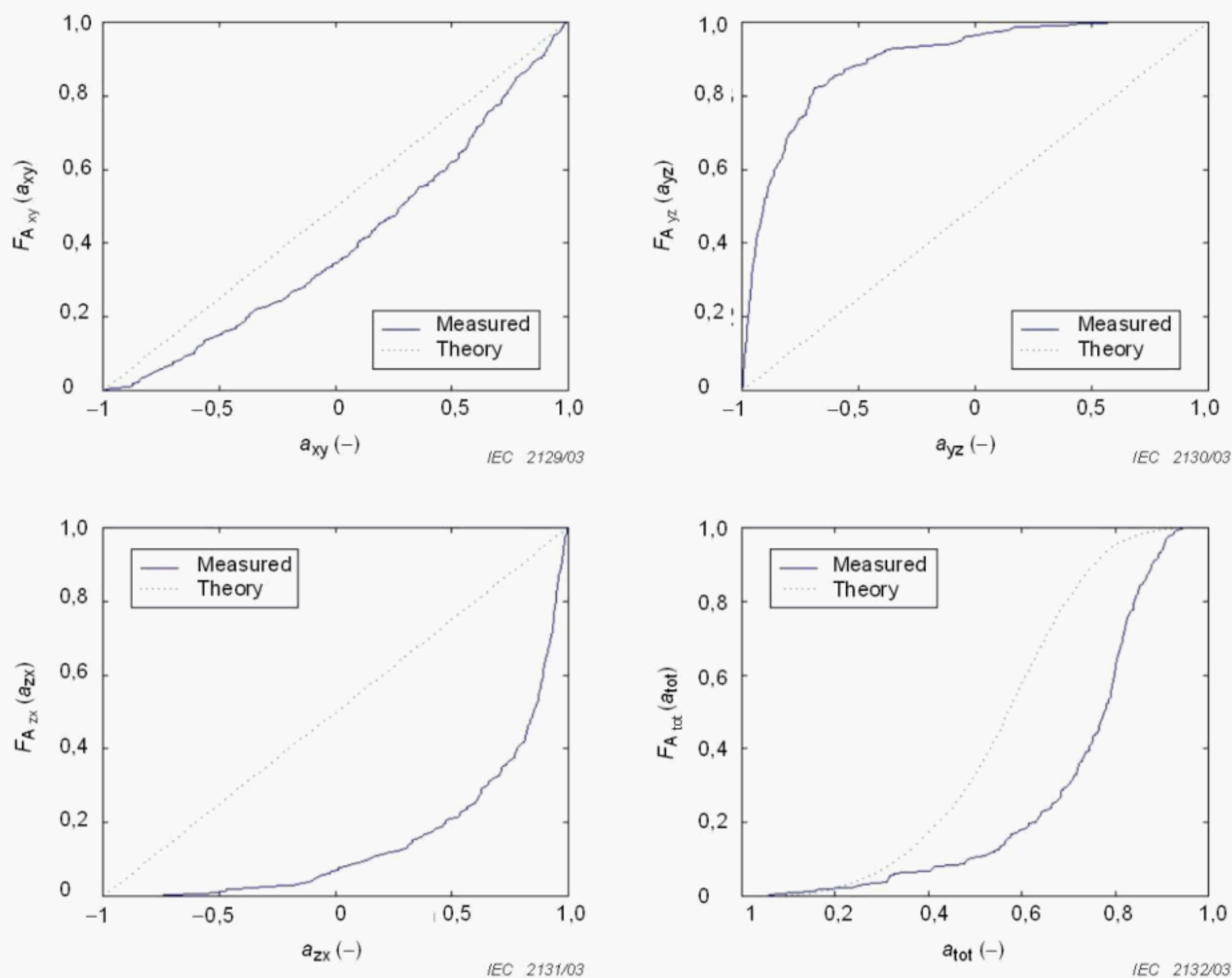
- [1] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Electric field probe measurements in the NPL untuned stadium reverberation chamber, National Physical Laboratory (UK), Technical Report CETM 13, Sep. 1999, Appendix H.
- [2] ARNAUT, LR., Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, May 2002, vol. 44 no. 2, pp. 442-457.
- [3] LUNDÉN, O. and BÄCKSTRÖM, M., Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers: evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, Aug. 21 – 25, 2000, pp. 11-16.
- [4] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Evaluation of the NPL untuned stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques, National Physical Laboratory (UK), Technical Report CEM 11, Aug. 1998.





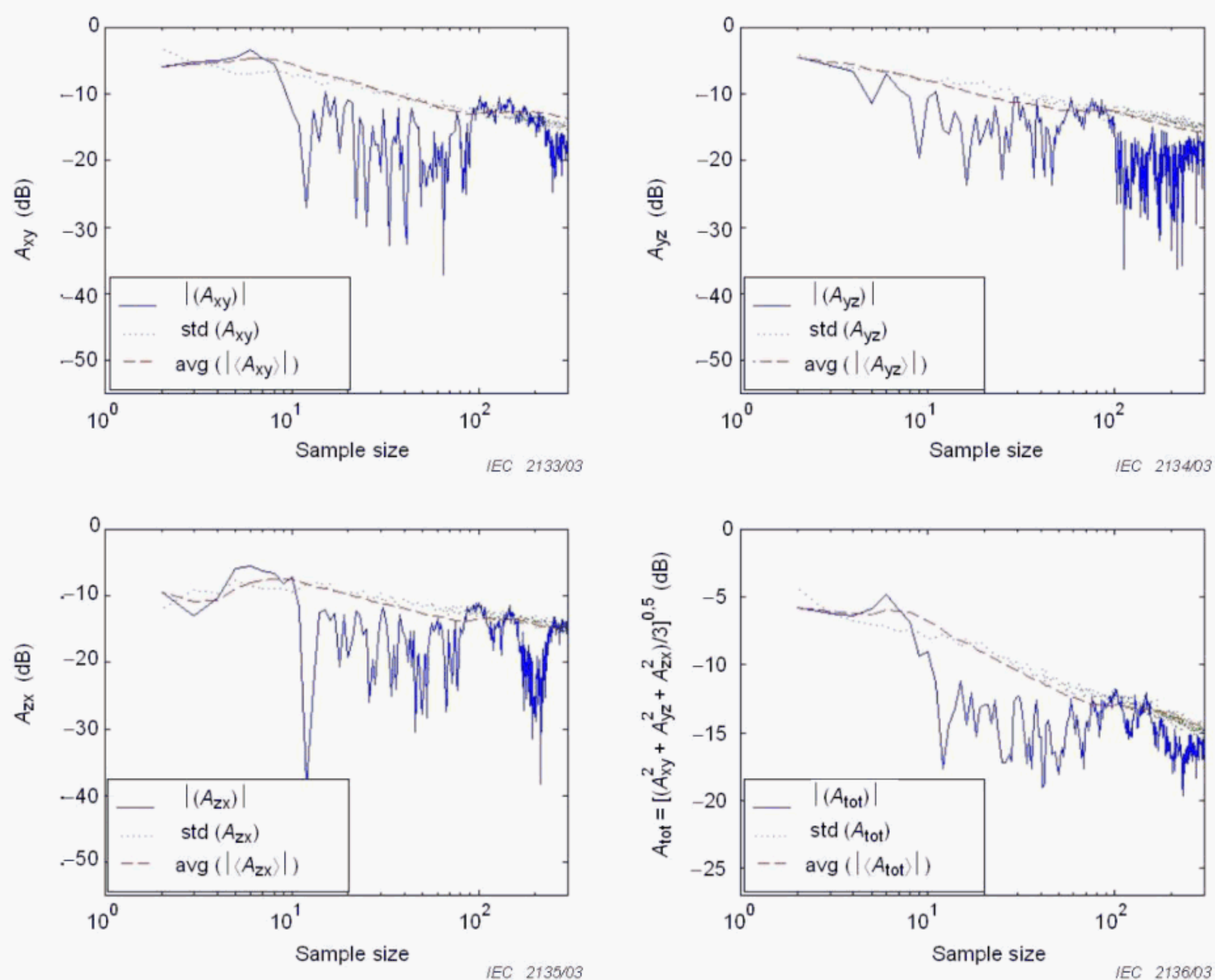
**Figure J.1 – Theoretical and typical measured distributions for field anisotropy coefficients in a well-stirred chamber**





**Figure J.2 – Theoretical and typical measured distributions for field anisotropy coefficients in a poorly stirred chamber**





**Figure J.3 – Typical measured values for field anisotropy coefficients as a function of  $N$  in a well-stirred chamber**



## Annex K (informative)

### Measurement uncertainty for chamber validation – Emission and immunity testing

#### K.1 General remarks

##### K.1.1 Measurement uncertainty in standardisation

Standard methodologies for the expression and evaluation of general measurement uncertainty (MU), not limited to EMC, are addressed in [1]<sup>13</sup>. Considerations of the evaluation of MU in EMC test methods are given in [2] and [3]. A more detailed account of the expression of MU for reverberation chambers (RCs) is given in [4].

##### K.1.2 Measurement uncertainty in reverberation chambers versus other alternative EMC test methods

Compared to MU for other alternative plane-wave EMC test methods, certain contributions to the MU budget (e.g., chamber imperfections, ambient and environmental aspects, antenna effects, instrumentation etc.) are also applicable to reverberation chambers. Other contributions (e.g., cable lay-out, orientation and distance between EUT and antenna, position tolerance, etc.) are less or not at all significant in a RC, whereas uncertainty due to the inherently random nature of the field in a RC is a major additional contribution to the overall MU unique to RCs.

##### K.1.3 Intrinsic field uncertainty versus measurement instrumentation uncertainty

A detailed calculation of the complete MU budget [2], [3] is beyond the scope of this annex, which only deals with contributions to MU that are specific to a reverberation chamber. Here, the additional contribution by the intrinsic field uncertainty (IFU), due to the statistical nature of the field inside a RC, is addressed. Only idealized conditions of operation (overmoded regime) lend themselves to a traceable evaluation of MU [4]. The treatment here is limited to such conditions. The effect of imperfections of random field on its uncertainty and confidence intervals is discussed in A.2.2.

The field strength and power density inside a reverberation chamber are random quantities, because of the high sensitivity of the cavity field to changes of the boundaries or excitation in space or time. For typical conditions of operation (excluding chambers with an exceedingly high quality factor, such as welded aluminium chambers), the intrinsic uncertainty for the field or power dominates the measurement instrumentation uncertainty (MIU) by one or more order of magnitudes. To compare the relative contributions of the MIU and IFU to the overall MU at a given frequency,  $f$ , the standard deviation of the rectangular (single-axis) component of the in-phase or quadrature component of the electric field that results from IFU is given by

$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{\eta_{Tx} Q(f)}{12\pi \varepsilon_0 f V(f)}} \langle P_{Tx} \rangle \quad (K.1)$$

where

$\varepsilon_0$  is the permittivity of free space ( $\approx 8,85 \times 10^{-12}$  F/m),

$\eta_{Tx}$  is the efficiency of the transmitting antenna,

$Q(f)$  is the quality factor of the chamber at frequency  $f$ ,

<sup>13</sup> Figures in square brackets refer to Clause K.4, Reference documents, are at the end of this annex.



$f$  is the frequency of operation (in Hz),

$V(f)$  is the working volume of the chamber at frequency  $f$  (in m<sup>3</sup>), and

$\langle P_{Tx} \rangle$  is the average transmitted power over all tuner or stirrer positions (in W).

The standard deviation of the power density and field magnitude are  $2\sigma^2/\eta_0$  and  $0,655 \sigma$ , respectively, where  $\eta_0$  is the intrinsic impedance of free space (377  $\Omega$ ). The IFU depends mainly on the number of independent samples that one chooses to generate in the process of chamber validation or EMC testing. The IFU generally decreases in inverse proportion to the square root of this number (see discussion in A.4.2 and A.4.3). The IFU is also influenced by the maximum number of independent samples that a mode stirrer is capable of generating in this RC. In general, the finiteness of this maximum number gives rise to a reduction in MU. For the purpose of this annex, it is assumed that this maximum number is infinite, representing a worst-case scenario that would be attained at arbitrarily high frequencies.

The IFU can be reduced by increasing the number of mode stirrers, or stirring mechanisms to provide additional scanning or averaging. Some aspects and results are given in [4]. Here, only a single mechanical mode tuner is considered, without spatial or frequency scanning.

## K.2 Emissions

For emissions measurements, the typical primary quantity of interest is the average transmitted radiated power density, integrated over all spatial directions and propagation and polarisation. Occasionally, the maximum power density, or the field strength (average or maximum) is the quantity of interest that can be derived from the measured transmitted power.

Using a substitution method [2], the average value of the total power emitted by an EUT can be related to its average received power  $\langle P_{Rx} \rangle$  inside an ideal reverberation chamber as

$$\langle P_{Tx} \rangle = CLF \frac{\langle P_{Rx} \rangle}{\langle P_{Rx,ref} \rangle} \langle P_{Tx,ref} \rangle \quad (K.2)$$

where

$CLF$  is the loading factor of the EUT for the chamber at frequency  $f$  (see Annex B),

$P_{Tx,ref}$  is the power transmitted in the unloaded chamber (i.e., without EUT) at  $N$  tuner or stirrer positions,

$P_{Rx,ref}$  is the power received in the unloaded chamber at  $N$  tuner or stirrer positions, and

$P_{Tx}$  is the power received in the chamber with EUT at  $N$  tuner or stirrer positions.

NOTE For the estimation of the average power  $\langle P_{Tx} \rangle$ , the stirrer positions need not be statistically independent. However, for the estimation of measurement uncertainty for  $\langle P_{Tx} \rangle$ , independent samples are required.

The sample mean value for  $N$  sample values of the received power  $P_{Rx,1}, \dots, P_{Rx,N}$  is

$$\text{avg}(P_{Rx}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{Rx,i} \quad (K.3)$$

For  $N$  statistically independent stirrer positions, the standard deviation of the average value is

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})} = \frac{\sigma_{P_{Rx}}}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \langle P_{Rx} \rangle]^2}}{N} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \text{avg}(P_{Rx})]^2}{N(N-1)}} \quad (K.4)$$



From (2) and (3), the ensemble estimates are

$$\langle P_{Rx} \rangle \approx \text{avg}(P_{Rx}), \quad \sigma_{P_{Rx}} \approx \sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})} \sqrt{N} \quad (\text{K.5})$$

For large values of  $N$ ,  $\langle P_{Rx} \rangle$  is approximately normally distributed, with a 95 % confidence interval given by

$$\left[ \text{avg}(P_{Rx}) - 1,96 \sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})}, \text{avg}(P_{Rx}) + 1,96 \sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})} \right] \quad (\text{K.6})$$

When  $N < 30$ , the confidence interval has a comparable width, but shows an upward shift compared to the normal approximation Equation (K.6) [4].

At frequencies for which the field uniformity criterion is met, the corresponding confidence interval for  $\langle P_{Tx} \rangle$  is

$$\left[ \text{avg}(P_{Tx}) - 1,96 \sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})}, \text{avg}(P_{Tx}) + 1,96 \sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})} \right] \quad (\text{K.7})$$

with

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})} \approx \frac{16\pi^2 V(f) f^3}{c^3 \eta_{Rx} Q(f)} \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \text{avg}(P_{Rx})]^2}{N(N-1)}} \quad (\text{K.8})$$

where

$c$  is the velocity of light in vacuum, approximately  $3 \times 10^8$  m/s,

$Q(f)$  is the quality factor of the chamber at  $f$  (dimensionless),

$\eta_{Rx}$  is the radiation efficiency of the receiving antenna during emission measurement (dimensionless),

$V(f)$  is the working volume of the chamber at  $f$  (in  $\text{m}^3$ ).

The estimate (7) assumes that the uncertainty of the measurement-based estimate of  $Q$  is negligibly small compared to  $\sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})}$ . Otherwise, Equation (K.8) is generalized to

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})} \approx \sqrt{\left[ \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3 \eta_{Rx} \text{avg}(Q)} \sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})} \right]^2 + \sigma_{\text{Avg}(Q)}^2} \quad (\text{K.9})$$

where

$$\text{avg}(Q) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i = \frac{16\pi^2 V}{M \eta_{Rx} \lambda^3} \sum_{i=1}^M \frac{\langle P_{Rx} \rangle_i}{\langle P_{Tx} \rangle_i} \quad (\text{K.10})$$

$$\sigma_{\text{Avg}(Q)} = \frac{\sigma_Q}{\sqrt{M}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M [Q_i - \langle Q \rangle]^2}}{M} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [Q_i - \text{avg}(Q)]^2}{M(M-1)}} \quad (\text{K.11})$$

are obtained by evaluation of  $Q$  at  $M$  different locations of the receiving antenna that are spaced at least half a wavelength apart from each other. Here,  $\text{avg}(P_{Rx})$  is calculated based on  $N \times M$  measured values during chamber validation, i.e.,  $N$  and  $N-1$  in Equations (K.3) and (K.4) are replaced by  $N \times M$  and  $(N - (-1)) \times (M - (-1))$ , respectively, with  $N, M > 1$ .



For a chamber that is reverberating sufficiently well and provided the emitting source does not load the chamber ( $CVF = 1$ ),  $\sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Tx}})}$  can be estimated from  $S_{21}$ -parameter measurements between a pair of transmitting-receiving antennas, or measurement of received power for a known reference input power, as [4]

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Tx}})} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[ 1 + \left( \frac{\text{avg}(P_{\text{Rx}})}{\sigma_{P_{\text{Rx}}}} \right)^2 - 8 \frac{\langle |S_{21}|^2 \rangle}{1 - 2\langle |S_{21}|^2 \rangle} \right]} \text{avg}(P_{\text{Tx}}) \quad (\text{K.12})$$

The effect of impedance mismatch becomes significant when  $\langle |S_{21}|^2 \rangle \sim 0,167$  (–7,8 dB).

Figure K.1 shows an estimated average value and widths of an associated 95 % confidence interval for the emitted power obtained from measurement of a reference radiating EUT, as a function of frequency, for one or three locations of the EUT. Figure K.2. compares the standard uncertainty for the transmitted power and its average over 100 stirrer positions with ideal theoretical values.

For measurement at a number of EUT locations  $M$ , the MU of the estimated average emitted power decreases by a factor  $1/\sqrt{M}$ .

### K.3 Immunity

Generally, in immunity measurements, the pass/fail criterion determines whether the EUT shows a sign of failure when illuminated by a known field strength or power. The estimate of uncertainty levels given below does not address the uncertainty in the process of interpreting the sign of failure, but only addresses the uncertainty in setting up the given field strength.

Immunity testing in reverberation chambers is usually performed against the maximum field strength or the maximum energy or power density across one rotation of the mode tuner, rather than the average field or power. These maximum values are themselves random (statistical) quantities with respect to spatial position. Therefore, the associated uncertainties are considerably larger than in the case of emissions.

Assuming zero uncertainty for the Q factor, working volume and transmitted power, an  $\eta$  %-confidence interval for  $\langle |E_x|_{\text{max}} \rangle$  received from a lossless impedance-matched transmitter has bounds given by

$$\xi_{\eta\%}^{\pm} \cong \sqrt{\frac{\lambda \eta_v Q}{6\pi V} \ln \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{2} \left( 1 \pm \frac{\eta}{100} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1}} \langle P_{\text{Tx}} \rangle \quad (\text{K.13})$$

where

$\eta_v$  is the impedance of free space (in  $\Omega$ ),

$V$  is the working volume of the chamber (in  $\text{m}^3$ ),

$Q$  is the quality factor of the chamber at wavelength  $\lambda$  (dimensionless), and

$N$  is the number of statistically independent tuner positions at wavelength  $\lambda$ .

The interval is centred around the average value  $\langle |E_x|_{\text{max}} \rangle$ , which can be estimated as



$$\langle |E_x|_{\max} \rangle \approx \sqrt{\frac{\lambda \eta_v Q}{6\pi V} \left[ 0,577 + \ln(N+1) - \frac{1}{2(N+1)} \right] \langle P_{Tx} \rangle} \quad (K.14)$$

The width of the confidence interval is defined by the difference of upper and lower percentiles, normalized by the mean value, as

$$\frac{\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-}{\langle |E_x|_{\max} \rangle} = \frac{\sqrt{\ln \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\eta}{100} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1}} - \sqrt{\ln \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\eta}{100} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1}}}{\sqrt{0,577 + \ln(N+1) - \frac{1}{2(N+1)}}} \quad (K.15)$$

Similar expressions for the maximum received power can be derived [4]. The limits and widths for a confidence interval for  $\langle |E_x|_{\max} \rangle$  and  $\langle P_{x,\max} \rangle$  are shown in Figures K.3 and K.4 as a function of  $N$  for selected values of  $\eta$  %. Figure K.3 shows that for relatively low values of  $N$  the asymmetry of this interval is substantial. Alternatively, the MU can be expressed using an expanded uncertainty, based on expressions for the standard deviation of  $|E_x|_{\max}$  [4], [6], [7].

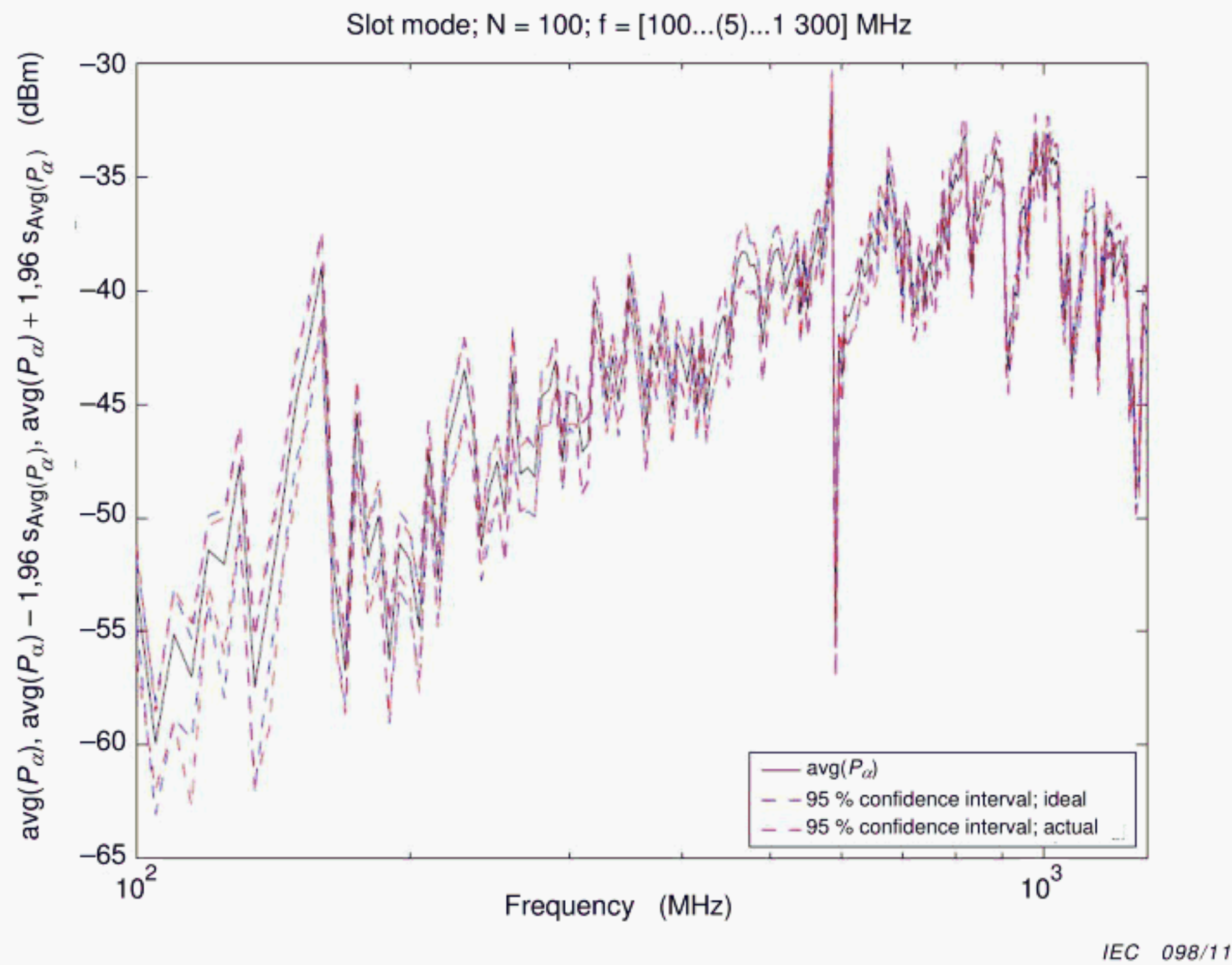
When the average value or standard deviation of  $|E_x|$  or  $P_x$  is not a priori known and needs to be estimated from the test data itself, the distribution and confidence intervals are more complicated [4] and the uncertainty can be significantly larger, especially for small values of  $N$ . Such small values may be either chosen deliberately (to minimize test time) or inevitably (at relatively low frequencies).

#### K.4 Reference documents

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [2] CISPR/TR 16-4-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling – Uncertainty in standardized EMC tests*
- [3] CISPR 16-4-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Uncertainties in EMC measurements*
- [4] ARNAUT, LR., Measurement uncertainty in reverberation chambers - I. Sample statistics, National Physical Laboratory (UK), Report TQE 2, Ed. 2.0, Dec. 2008. [[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/TQE2.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf)]
- [5] CORONA, P., LATMIRAL, G., PAOLINI, E., and PICCIOLI, L., Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 18 no. 2, pp. 54-59, May 1976; Comments and corrections, ibid., vol. 18 no. 4, p. 205, Nov. 1976.
- [6] LADBURY, J., KOEPKE, G., and CAMELL, D., Evaluation of the NASA Langley Research Center mode-stirred chamber facility, Nat. Inst. Stand. Technol., Technical Note 1508, pp. 1-282, Jan. 1999.
- [7] ARNAUT, LR., Estimation of maximum field strength and associated confidence intervals for EMC immunity testing in reverberation chambers, Safety & EMC (Beijing), pp. 16-19, May 2008 (special issue).

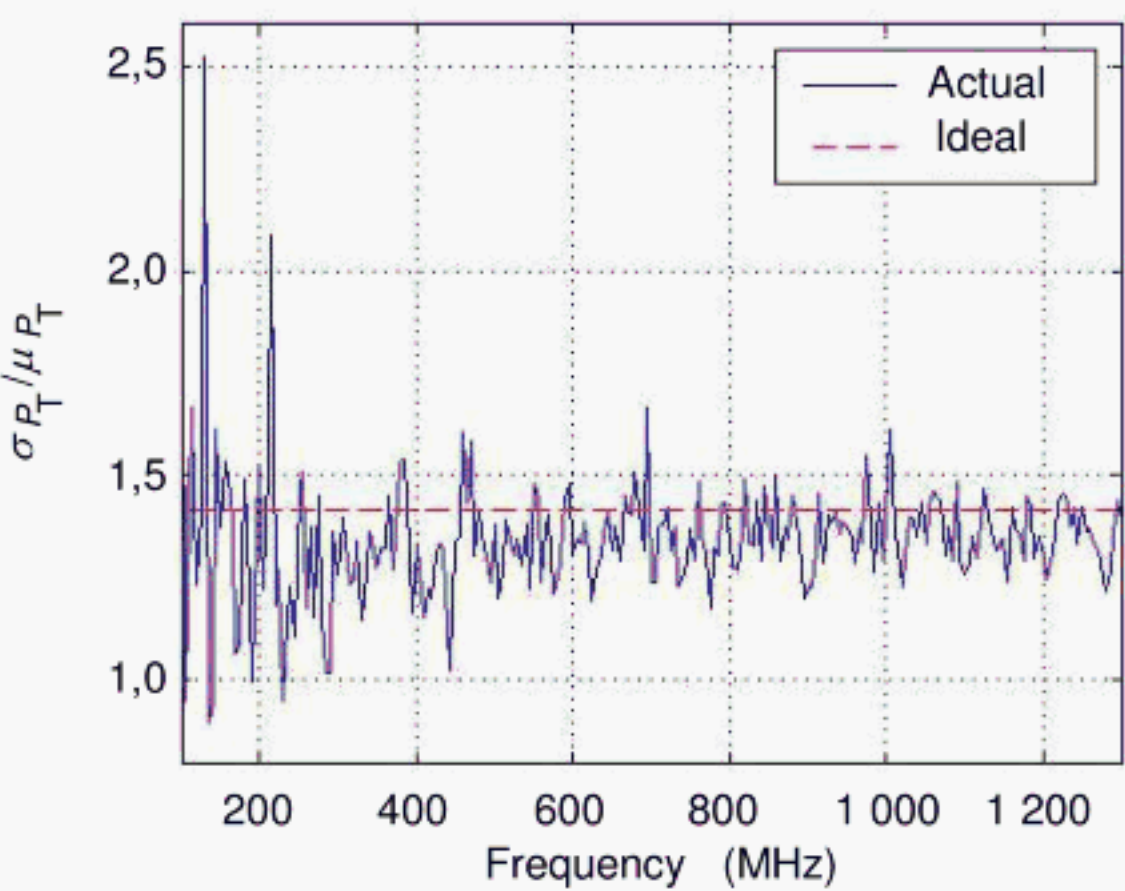


[8] HARRINGTON, TE., Update on informal interlaboratory comparison of reverb, GTEM, FAR, and OATS sites using RefRad and EU FAR Project Simple EUT, Proc. Reverberation Chamber, Anechoic Chamber and OATS Users Meeting, Austin, TX, 29-30 Apr. 2003.

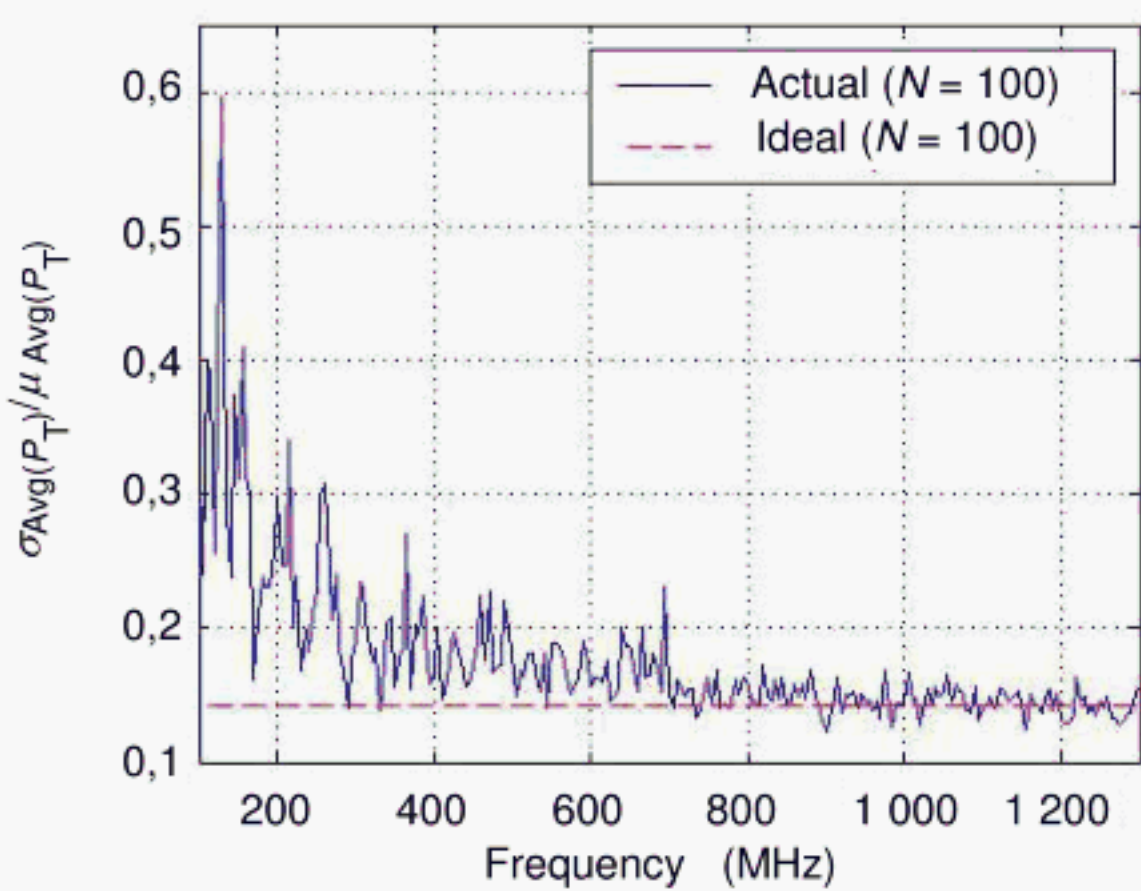


See references [4] and [8].

**Figure K.1 – Average emitted power as a function of frequency for a typical unintentional radiator**



**Figure K.2a) – Radiated power emitted by EUT power**

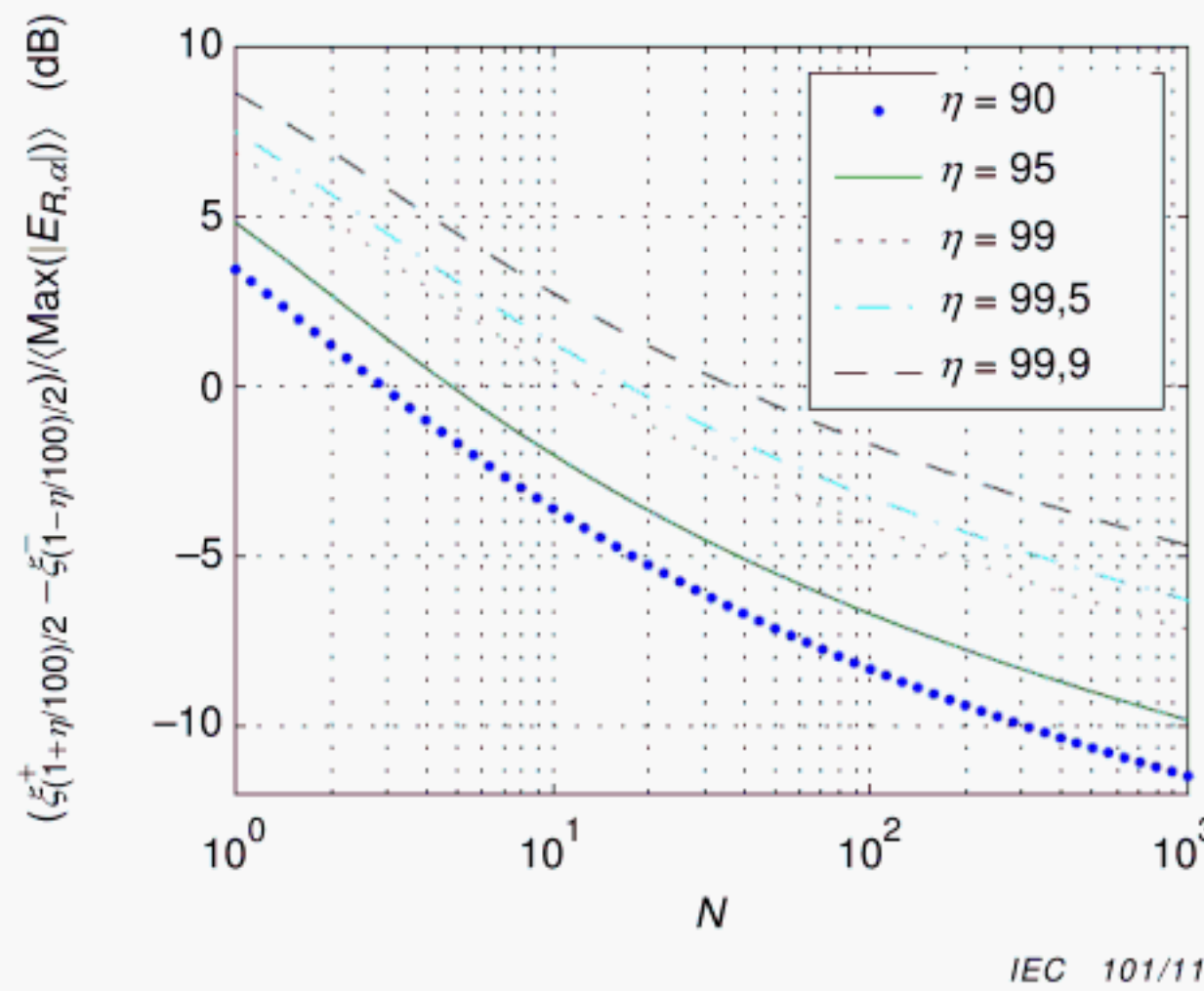


**Figure K.2b – Associated average radiated**

NOTE Estimated standard uncertainty normalized with respect to average value: (a) for radiated power emitted by EUT (see Figure K.2a) and (b) for associated average radiated power, compared to theoretical standard uncertainties for ideal chamber characteristics  $\sqrt{2}$  and  $\sqrt{2/100}$ , respectively (see Figure K.2b)). Measured, respectively idealized correlations between S-parameters are taken into account in both cases.

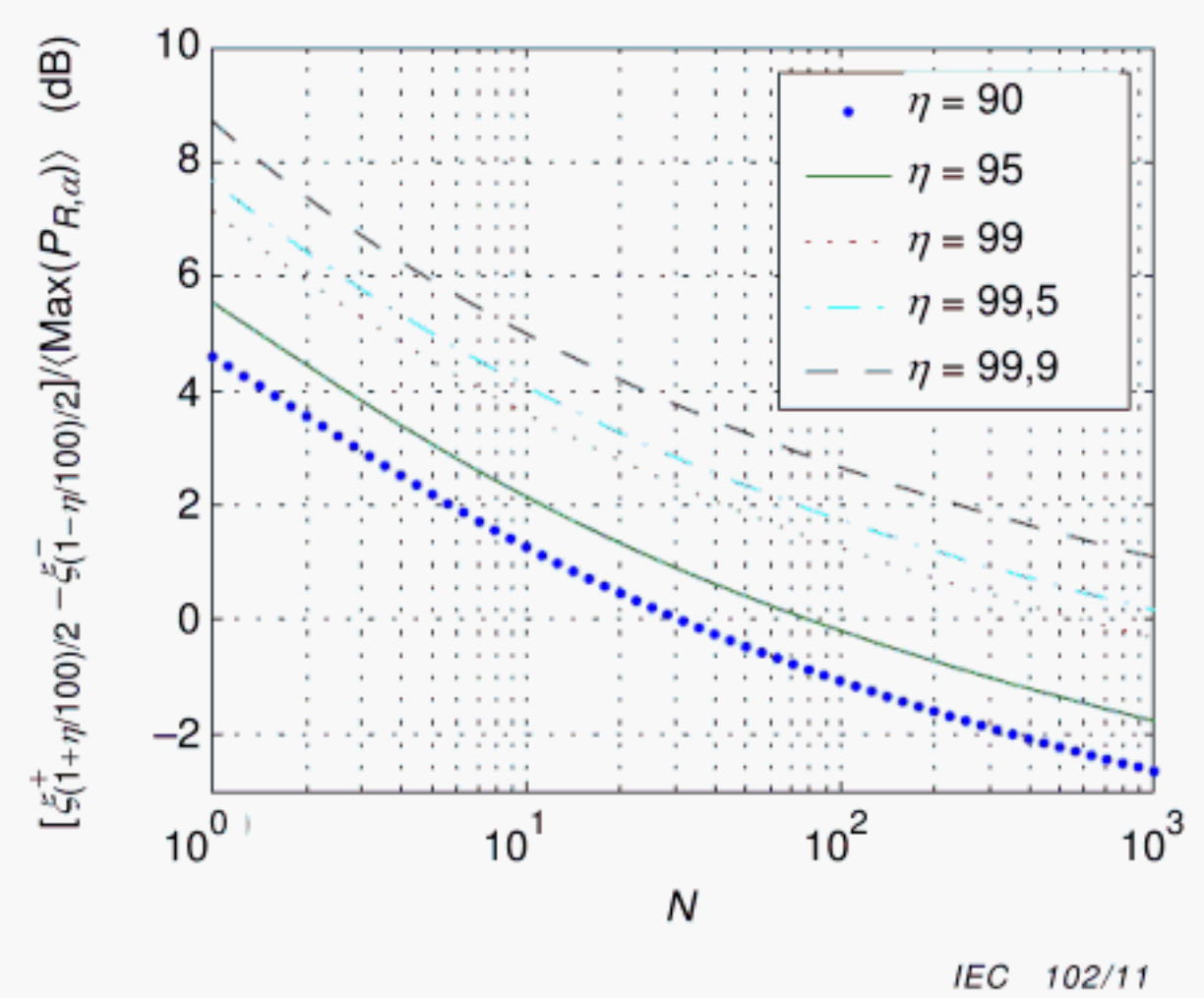
**Figure K.2 – Estimated standard uncertainty**





NOTE Mean-normalized width  $(\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-) / \langle |E_{x,\max}| \rangle$  for maximum field strength  $|E_{x,\max}|$  is associated with a  $\eta\%$ -confidence interval for  $|E_{x,\max}|$  and is based on a specified number of independent stirrer positions  $N$ .

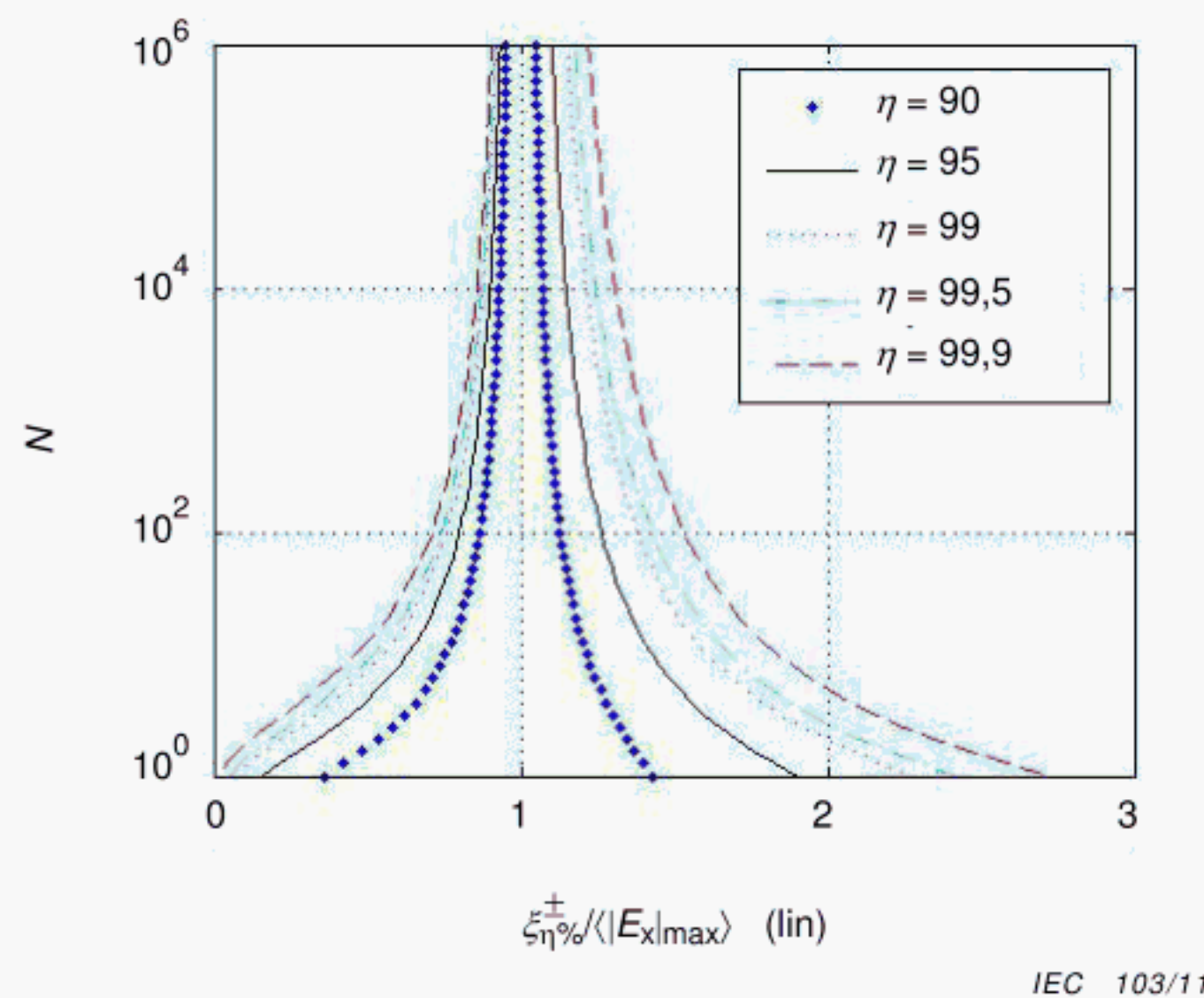
Figure K.3a) – Mean normalized width (in dB) of a  $\eta\%$ -confidence interval for maximum field strength



NOTE Mean-normalized width  $(\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-) / \langle P_{x,\max} \rangle$  for the maximum received power  $P_{x,\max}$  is associated with a  $\eta\%$ -confidence interval for  $P_{x,\max}$  and is based on a specified number of independent stirrer positions  $N$ .

Figure K.3b) – Mean normalized width (in dB) of a  $\eta\%$ -confidence interval for maximum received power

Figure K.3 – Mean normalized width (in dB) of a  $\eta\%$ -confidence interval



NOTE Mean-normalized upper and lower interval boundaries,  $\xi_{\eta\%}^+ / \langle |E_{x,\max}| \rangle$  and  $\xi_{\eta\%}^- / \langle |E_{x,\max}| \rangle$  specify a  $\eta\%$ -confidence interval for  $|E_{x,\max}|$  with mean normalized width  $(\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-) / \langle |E_{x,\max}| \rangle$ .

Figure K.4 – Individual mean-normalized interval boundaries (in linear units) for maximum field strength as a function of the number of independent stirrer positions  $N$



## Bibliography

IEC 60050-121:1998, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 121: Electromagnetism*

IEC 60050-151:2001, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 151: Electrical and magnetic devices*

IEC 60050-393:2003, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 393: Nuclear instrumentation – Physical phenomena and basic concepts*

IEC 60050-394:2007, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 394: Nuclear instrumentation – Instruments, systems, equipment and detectors*

IEC 60050-702:1992, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 702: Oscillations, signals and related devices*

IEC 60050-705:1995, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 705: Radio wave propagation*

IEC 60050-712:1992, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 712: Antennas*

IEC 60050-723:1997, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 723: Broadcasting: Sound, television, data*  
Amendment 1 (1999)

IEC 60050-726:1982, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 726: Transmission lines and waveguides*

IEC 60050-731:1991, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 731: Optical fibre communication*

IEC 60050-801:1994, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

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

CISPR 16-1-2, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Conducted disturbances*

CISPR 16-1-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-3: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Disturbance power*

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

CISPR 16-1-5, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Antenna calibration test sites for 30 MHz to 1 000 MHz*



CISPR 16-2-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity – Conducted disturbance measurements*

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

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

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

---







## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	113
INTRODUCTION.....	116
1 Domaine d'application .....	117
2 Références normatives.....	117
3 Termes, définitions et abréviations .....	118
3.1 Termes et définitions .....	118
3.2 Abréviations .....	122
4 Généralités.....	122
5 Environnements d'essai et limitations .....	123
6 Applications.....	123
6.1 Immunité rayonnée.....	123
6.2 Emissions rayonnées .....	123
6.3 Mesures de l'efficacité d'écran .....	123
7 Matériels d'essai .....	124
8 Validation de la chambre .....	125
9 Essais .....	126
10 Résultats d'essai, rapport d'essai et conditions d'essai.....	126
Annexe A (informative) Vue d'ensemble de la chambre réverbérante .....	127
Annexe B (normative) Validation de la chambre par brassage de modes pas à pas .....	152
Annexe C (normative) Validation de la chambre et essais par brassage de modes continu.....	161
Annexe D (normative) Essais d'immunité aux émissions rayonnées .....	168
Annexe E (normative) Mesures des émissions rayonnées .....	173
Annexe F (informative) Mesures d'efficacité d'écran des assemblages de câbles, des câbles, des connecteurs, des guides d'ondes et des composants passifs hyperfréquence.....	181
Annexe G (informative) Mesures de l'efficacité de blindage des joints d'étanchéité et des matériaux .....	185
Annexe H (informative) Mesures de l'efficacité de blindage des enceintes .....	196
Annexe I (informative) Mesures d'endement d'antenne .....	203
Annexe J (informative) Evaluation directe des performances de réverbération en utilisant les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ .....	205
Annexe K (informative) Incertitude de mesure pour la validation de la chambre – Essais d'émissions et d'immunité.....	214
Bibliographie.....	223
Figure A.1 – Uniformité de champ type pour 200 pas indépendants du brasseur.....	143
Figure A.2 – Structure modale théorique pour une chambre de 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m .....	143
Figure A.3 – Structure modale théorique avec faible largeur de bande du facteur de qualité ( $Q$ élevé) superposée sur le 60 <sup>ème</sup> mode.....	144
Figure A.4 – Structure modale théorique avec largeur de bande du facteur de qualité plus élevée ( $Q$ plus faible) superposée sur le 60 <sup>ème</sup> mode.....	144
Figure A.5 – Installation de chambre réverbérante type .....	145
Figure A.6 – Exigences d'échantillonnage théorique pour une confiance de 95 % .....	146



Figure A.7 – Fonction de densité de probabilité normalisée d'une composante de champ électrique à un emplacement fixe pour une mesure avec un seul échantillon .....	146
Figure A.8 – Fonction de densité de probabilité normalisée de la moyenne d'une composante de champ électrique à un emplacement fixe pour une mesure avec $N$ échantillons indépendants.....	147
Figure A.9 – Fonction de densité de probabilité normalisée de la valeur maximale d'une composante de champ électrique à un emplacement fixe pour une mesure avec $N$ échantillons indépendants .....	147
Figure A.10 – Volume de travail de la chambre .....	148
Figure A.11 – Données types de sonde.....	149
Figure A.12 – Données normalisées moyennes pour la composante $x$ de 8 sondes .....	149
Figure A.13 – Ecart type des données pour les composantes du champ $E$ de 8 sondes .....	150
Figure A.14 – Distribution des absorbants pour l'essai relatif aux effets de charge .....	150
Figure A.15 – Amplitude de charge pour l'essai relatif aux effets de charge .....	151
Figure A.16 – Données d'écart type pour composantes de champ électrique de huit sondes dans la chambre chargée.....	151
Figure B.1 – Emplacements de sonde pour la validation de la chambre .....	160
Figure C.1 – Puissance reçue (dBm) en fonction de la ou des rotation(s) du brasseur à 500 MHz .....	166
Figure C.2 – Puissance reçue (dBm) en fonction de la ou des rotations du brasseur à 1 000 MHz .....	167
Figure D.1 – Exemple d'installation d'essai adaptée.....	172
Figure E.1 – Exemple d'installation d'essai adaptée.....	179
Figure E.2 – Relation avec le calcul du facteur géométrique pour les émissions rayonnées.....	180
Figure F.1 – Montage type d'essai .....	184
Figure G.1 – Montage type d'essai.....	194
Figure G.2 – Installation d'essai type pour les essais de joint d'étanchéité et/ou matériau .....	194
Figure G.3 – Installation d'essai configurée pour la validation .....	195
Figure H.1 – Installation de l'enceinte d'essai type pour les essais d'enceinte de sol .....	202
Figure H.2 – Installation de l'enceinte d'essai type pour les essais d'enceintes montées sur banc .....	202
Figure J.1 – Distributions théoriques et types mesurées pour les coefficients d'anisotropie de champ dans une chambre bien brassée .....	211
Figure J.2 – Distributions théoriques et types mesurées pour les coefficients d'anisotropie de champ dans une chambre mal brassée .....	212
Figure J.3 – Valeurs mesurées types pour les coefficients d'anisotropie de champ en fonction de $N$ dans une chambre bien brassée.....	213
Figure K.1 – Puissance émise moyenne en fonction de la fréquence pour une antenne non intentionnelle type.....	220
Figure K.2 – Incertitude estimée normalisée .....	221
Figure K.3 – Largeur moyenne normalisée (en dB) pour un intervalle de confiance à $\eta\%$ ....	221
Figure K.4 – Limites d'intervalle moyennes normalisées individuelles (en unités linéaires) pour une intensité de champ maximale en fonction du nombre de positions indépendantes $N$ du brasseur .....	222
Tableau B.1 – Exigences d'échantillonnage .....	159



Tableau B.2 – Exigences de tolérance pour l'uniformité du champ .....	159
Tableau J.1 – Valeurs types pour coefficients d'anisotropie de champ totale pour une qualité de réverbération «moyenne» et «bonne» .....	210



## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

**Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure –  
Méthodes d'essai en chambre réverbérante**

## 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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61000-4-21 a été établie par le sous-comité 77B: Phénomènes haute fréquence, du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique, avec la coopération du sous-comité A du CISPR: Mesures des perturbations radioélectriques et méthodes statistiques.

Elle constitue la Partie 4-21 de la CEI 61000 et a le statut de publication fondamentale en CEM, conformément au Guide 107 de la CEI.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2003. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:



- A l'Article 8, l'utilisation et les spécifications de sondes de champ  $E$  pour application aux chambres réverbérantes ont été ajoutées. Les notes complémentaires font référence aux aspects généraux et aux procédures d'étalonnage des sondes. La plage de linéarité spécifiée de la réponse des sondes est plus étendue et couvre un intervalle asymétrique par comparaison à celui devant être utilisé dans les chambres anéchoïques (voir l'Annexe I de la CEI 61000-4-3), parce que
  - les variations de puissance et des champs dans les chambres réverbérantes présentent une dynamique plus grande, et
  - la procédure de validation des chambres est basée sur l'application de valeurs de champ maximales, par opposition au champ proprement dit ou à sa valeur moyenne, respectivement.
- L'Annexe A contient des recommandations supplémentaires et des clarifications concernant l'utilisation de chambres réverbérantes à des fréquences de fonctionnement relativement faibles (c'est-à-dire proches de la fréquence utilisable la plus faible d'une chambre donnée), et les conséquences de cette utilisation sur l'estimation de l'incertitude ont été décrites. Des recommandations sur la disposition des câbles ont été ajoutées. Une justification a été ajoutée qui explique l'assouplissement de l'exigence d'uniformité de champ en dessous de 400 MHz, ce qui représente un compromis entre des motifs technico-scientifiques et économiques lors de l'utilisation de chambres avec une fréquence d'environ 100 MHz. Une correction du premier ordre de la valeur limite du coefficient de corrélation pour des nombres de positions du brasseur relativement faibles a été ajoutée. Les questions relatives à l'utilisation de positions du brasseur non équidistantes aux basses fréquences font l'objet d'une note complémentaire.
- A l'Annexe B, l'emplacement symétrique des sondes de champ, lorsque la chambre présente une symétrie cylindrique, a été refusé dans la mesure où ce type d'emplacement est susceptible de donner une indication erronée de l'uniformité de champ et de la performance de la chambre à des emplacements différents. La différence entre la fréquence de départ applicable à la validation de la chambre et la fréquence d'essai la plus faible a été clarifiée. Le séquençement du brasseur applicable à la validation et aux essais de la chambre est désormais spécifié comme étant égal dans les deux cas. Les exigences d'échantillonnage relatives à la validation de la chambre insistent désormais sur le nombre minimal requis de pas indépendants du brasseur à utiliser, tandis que le nombre minimal recommandé d'échantillons par intervalle de fréquence a été remplacé par le nombre d'échantillons indépendants que le brasseur peut fournir par fréquence, à appliquer dans le cas où la validation de la chambre n'est pas satisfaite pour le nombre minimal requis.
- L'Annexe C contient à présent davantage de recommandations quantitatives concernant le réglage des vitesses de brassage maximales admissibles qui garantissent des conditions de fonctionnement quasi-statiques pour la validation et les essais de la chambre. Une attention toute particulière est accordée à toutes les échelles de temps caractéristiques de tous les composants ou sous-systèmes d'un mesurage ou d'un essai. Des questions spécifiques relatives à la validation de la chambre, aux essais d'immunité et à la largeur de bande sont traitées. Les exigences particulières relatives aux sondes de champ lorsqu'elles sont utilisées en mode brassage sont énumérées.
- A l'Annexe D, une exigence stipulant que le matériel en essai et les autres équipements ne doivent pas occuper plus de 8 % du volume total de la chambre dans les essais d'immunité a été ajoutée. Le nombre maximal de points de fréquence et la formule de calcul de ces points ont été généralisés. Une spécification obligatoire portant sur l'inclusion de l'équipement de mesure, du plan d'essai et de la disposition des câbles dans le rapport d'essai a été ajoutée afin de régler tout différend en cas de divergences, notamment pour les essais d'immunité à basse fréquence.
- Des recommandations supplémentaires ont été ajoutées à l'Annexe E concernant la valeur de la directivité du matériel en essai à utiliser dans l'estimation de la puissance et du champ rayonnés. Des estimations élargies ont été ajoutées pour la directivité maximale de matériels en essai électriquement de grande taille et à rayonnement anisotrope, ainsi que pour les émissions rayonnées en présence d'un plan de sol. Une spécification obligatoire portant sur l'inclusion de l'équipement de mesure, du plan d'essai et de la disposition des



câbles dans le rapport d'essai a été ajoutée afin de régler tout différend en cas de divergences, notamment pour les essais d'émissions à basse fréquence.

- Certaines clarifications concernant les mesures de rendement d'antenne ont été ajoutées en Annexe I.
- Une nouvelle Annexe K a été ajoutée qui couvre l'incertitude de mesure dans les chambres réverbérantes. L'incertitude de champ intrinsèque relative à la validation de la chambre, aux mesures d'immunité et d'émissions est quantifiée. D'autres facteurs contribuant à l'incertitude de mesure sont énumérés.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
77B/619/CDV	77B/640/RVC

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.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication 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.

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**



## 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 produit)

### **Partie 4: Techniques d'essai et de mesure**

Techniques de mesure

Techniques d'essai

### **Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation**

Guide d'installation

Méthodes et dispositifs d'atténuation

### **Partie 6: Normes génériques**

### **Partie 9: Divers**

Chaque partie est à son tour subdivisée en plusieurs parties, publiées soit comme normes internationales soit comme spécifications techniques ou rapports techniques, dont certains ont déjà été publiés comme sections. D'autres seront publiées avec le numéro de partie, suivi d'un tiret et complété d'un second numéro identifiant la subdivision (exemple: CEI 61000-6-1).



## COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

### Partie 4-21: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai en chambre réverbérante

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61000 porte sur les essais d'immunité et d'émissions désirées ou non désirées pour les matériels électriques et/ou électroniques, et sur les essais d'efficacité d'écran dans les chambres réverbérantes. Elle établit les procédures d'essai nécessaires à la réalisation de ce type d'essais. Seuls les phénomènes rayonnés sont examinés.

L'objet de la présente partie est d'établir une référence commune pour l'utilisation des chambres réverbérantes dans le but d'évaluer les performances des matériels électriques et électroniques lorsqu'ils sont soumis à des champs électromagnétiques radioélectriques et dans le but de déterminer les niveaux des rayonnements radioélectriques émis par les matériels électriques et électroniques.

NOTE Des méthodes d'essai sont définies dans la présente partie pour mesurer l'effet des rayonnements électromagnétiques sur les matériels et celui des émissions électromagnétiques provenant des matériels concernés. La simulation et la mesure des rayonnements électromagnétiques ne sont pas appropriées pour la détermination quantitative des effets. Les méthodes d'essai définies sont organisées afin d'établir la reproductibilité et la répétabilité adéquates des résultats d'essai et l'analyse qualitative des effets.

La présente partie de la CEI 61000 n'est pas destinée à spécifier les essais qui doivent être appliqués à un appareil ou un système particulier. Elle vise principalement à offrir à tous les comités de produits concernés de la CEI une référence de base générale. Il convient que les comités de produits choisissent les limites d'émissions et les méthodes d'essai en concertation avec le CISPR. Les comités de produits restent responsables du choix approprié des essais d'immunité et des limites des essais d'immunité à appliquer à leurs matériels. Les autres méthodes, telles que celles couvertes dans la CEI 61000-4-3, le CISPR 16-2-3 et le CISPR 16-2-4 peuvent être utilisées<sup>1</sup>.

#### 2 Références normatives

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

CEI 60050(161):1990, *Vocabulaire Electrotechnique International – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

Amendement 1 (1997)

Amendement 2 (1998)

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

<sup>1</sup> Pour de plus amples informations, consulter le CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) et le TC 77 (Compatibilité électromagnétique).



CEI 61000-4-3:2006, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-3: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques*

Amendement 1 (2007)

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

### 3 Termes, définitions et abréviations

#### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61000-4, les termes et définitions suivants, ainsi que ceux donnés dans la CEI 60050(161), s'appliquent.

##### 3.1.1

##### **antenne**

partie d'une installation d'émission ou de réception d'ondes radioélectriques destinée à assurer le couplage nécessaire entre un émetteur ou un récepteur et le milieu où se propagent les ondes radioélectriques

[CEI 60050-712:1992, 712-01-01]

NOTE Pour les besoins de la présente procédure, on estime que les antennes ont un rendement de 75 % ou plus.

##### 3.1.2

##### **onde électromagnétique**

onde caractérisée par la propagation d'un champ électromagnétique variable dans le temps et engendrée par l'accélération de charges électriques

[CEI 60050-705:1995, 705-01-09, modifiée]

##### 3.1.3

##### **région de champ lointain**

région du champ électromagnétique d'une antenne ou d'un élément rayonnant non délibéré où les composantes prépondérantes du champ sont celles qui correspondent à une propagation d'énergie et où la répartition du champ en fonction de la direction est pratiquement indépendante de la distance à l'antenne

NOTE 1 Dans la région de champ lointain, toutes les composantes du champ électromagnétique décroissent de façon inversement proportionnelle à la distance à l'antenne.

NOTE 2 Pour une antenne à rayonnement transversal dont la dimension hors-tout maximale,  $D$ , est grande par rapport à la longueur d'onde,  $\lambda$ , on considère généralement que la région de champ lointain est située à des distances supérieures à  $2D^2/\lambda$ , par rapport à l'antenne dans la direction du rayonnement maximal.

[CEI 60050-712:1992, 712-02-02]

région éloignée d'une source de rayonnement ou d'une ouverture rayonnante, dans laquelle le diagramme de rayonnement ne dépend pas de la distance à la source

[CEI 60050-731:1991, 731-03-92]



**3.1.4****intensité du champ**

champ électromagnétique créé en un point donné par un émetteur radioélectrique à une fréquence caractéristique spécifiée, dans des conditions d'installation et pour un régime de modulation spécifiés

[CEI 60050-705:1995, 705-08-31]

NOTE 1 On utilise le terme «intensité de champ électrique» (en V/m) ou «intensité de champ magnétique» (en A/m) selon que l'amplitude mesurée est celle, respectivement, du champ électrique ou du champ magnétique. Dans la région de champ proche, la relation entre l'intensité de champ électrique et de champ magnétique et la distance dépend de la configuration particulière concernée. La puissance surfacique du champ est de la même façon indéterminée.

NOTE 2 Dans la zone lointaine, l'intensité du champ est parfois identifiée avec une puissance surfacique  $P$ . Pour une onde plane en espace libre,  $P = E^2 / \eta_V$ , où

$E$  est l'intensité du champ électrique, et

$\eta_V$  est l'impédance intrinsèque de l'espace libre, approximativement égal à  $120 \pi \Omega$ .

**3.1.5****polarisation**

propriété d'une onde électromagnétique ou d'un vecteur de champ sinusoïdal pur déterminée en un point fixe de l'espace par la direction du vecteur champ électrique ou d'un autre vecteur de champ spécifié; si cette direction varie dans le temps, la propriété peut être caractérisée par le lieu géométrique de l'extrémité du vecteur de champ considéré

[CEI 60050-726:1982, 726-04-01]

**3.1.6****chambre réverbérante**

local spécialement aménagé pour avoir une durée de réverbération très longue

[CEI 60050-723:1997, 723-03-30]

(salle réverbérante) salle caractérisée par une durée de réverbération suffisamment longue et spécialement étudiée pour que le champ (acoustique) y soit suffisamment diffus

NOTE 1 Cette salle consiste en une enceinte blindée qui est généralement équipée de brasseurs mécaniques qui modifient (brassent) la structure interne des champs électromagnétiques et, par conséquent, transforment la structure des champs électromagnétiques à l'intérieur de l'enceinte

[CEI 60050-801:1994, 801-31-13, modifiée]

NOTE 2 Les salles réverbérantes sont utilisées en particulier pour la mesure des facteurs d'absorption des matériaux et de la puissance émise par des sources rayonnantes intentionnelles ou non intentionnelles.

NOTE 3 Les essais en chambre réverbérante peuvent être décrits comme un processus stochastique au cours duquel les brasseurs mécaniques «brassent» les «modes» à l'intérieur de l'enceinte. Par conséquent, ces chambres sont également appelées chambres à brassage de modes.

**3.1.7****facteur de qualité (d'une chambre réverbérante)****Q**

(facteur de qualité) mesure, en fonction de la fréquence, de l'acuité de la résonance, égale à  $2\pi$  fois le rapport de l'énergie maximale emmagasinée dans le circuit à l'énergie dissipée pendant une période

[CEI 60050-151:2001, 151-15-46, modifiée]



mesure de la qualité de stockage de l'énergie de la chambre (voir l'Article A.6 [2]<sup>2</sup>)

NOTE Pour une chambre donnée,  $Q$  varie en fonction de la fréquence et peut être calculé comme suit:

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{MoyRec}}{P_{Entrée}} \right\rangle_n \quad (4)$$

où

$V$  est le volume de la chambre (en m<sup>3</sup>),

$\lambda$  est la longueur d'onde (en m),

$P_{MoyRec}/P_{Entrée}$  est le rapport de la puissance moyenne reçue sur la puissance d'entrée, chacune d'elles étant moyennée sur une séquence complète du brasseur,

$\left\langle \right\rangle_n$  indique la moyenne relativement au nombre de positions et orientations d'antenne,  $n$ ,

$\eta_{Tx}$  et  $\eta_{Rx}$  sont les facteurs de rendement de l'antenne (adimensionnels) pour les antennes d'émission (Tx) et de réception (Rx), respectivement. Si les données des fabricants ne sont pas disponibles, on peut estimer le rendement à 0,75 pour les antennes log périodiques et à 0,9 pour les antennes cornets,

$n$  indique le nombre de positions et d'orientations d'antenne pour lequel le  $Q$  a été évalué. Une seule position est requise au minimum, néanmoins de multiples positions et orientations peuvent être évaluées pour en faire une moyenne.

### 3.1.8

**largeur de bande du facteur** (d'une chambre réverbérante)

**$BW_Q$**

mesure de la gamme de fréquences sur laquelle les modes sont corrélés dans une chambre réverbérante (voir l'Article A.2)

NOTE La largeur  $BW_Q$  d'une chambre réverbérante peut être calculée comme suit:

$$BW_Q = f/Q \quad (5)$$

où

$f$  est la fréquence (en Hz),

$Q$  est le facteur de qualité défini en 3.1.7.

### 3.1.9

**mauvais fonctionnement**

perte de l'aptitude d'un matériel à accomplir ou à maintenir une fonction requise, ou initiation d'une action parasite intempestive entraînant des conséquences néfastes

NOTE Il convient que les critères fonctionnels d'acceptation soient précisés dans des spécifications particulières.

[CEI 60050-393:2003, 393-17-79]

### 3.1.10

**émission**

processus par lequel de l'énergie émane d'une source sous forme d'ondes ou de particules

[CEI 60050-702:2003, 702-02-03]

<sup>2</sup> Les chiffres entre crochets renvoient aux documents de référence dans les annexes respectives.



**3.1.11****brasseur**

dispositif mécanique élaboré à partir de matériaux électriquement conducteurs à faible perte, qui modifie les conditions électromagnétiques limites à l'intérieur d'une chambre réverbérante

NOTE En général, une chambre réverbérante est une enceinte blindée dont la dimension la plus faible est importante par rapport à la longueur d'onde à la fréquence utilisable la plus faible. La chambre est normalement équipée d'un dispositif mécanique de brassage dont les dimensions sont une partie significative des dimensions de la chambre et de la longueur d'onde à la fréquence utilisable la plus faible. Lorsque la chambre est excitée avec une énergie radioélectrique, les conditions aux limites de l'environnement électromagnétique multi-modes peuvent être modifiées par le brasseur mécanique. L'environnement qui en résulte est statistiquement uniforme et isotrope (ce qui signifie que l'énergie arrive de tous les angles d'exposition et dans toutes les directions de polarisation), lorsqu'on établit une moyenne sur un nombre suffisant de positions du brasseur mécanique.

**3.1.12****mode électromagnétique**

une des solutions des équations de Maxwell, représentant un champ électromagnétique dans un certain domaine de l'espace et appartenant à une famille de solutions indépendantes définie par des conditions aux limites spécifiées

[CEI 60050-705:1995, 705-01-12]

**3.1.13****validation**

processus permettant de confirmer qu'une instrumentation, un système de commande (matériel et logiciel) et une installation d'essai finalisés sont conformes à toutes ses exigences fonctionnelles, de performances et d'interfaces

[CEI 60050-394:2007, 394-40-42, modifiée]

**3.1.14****validation de la chambre**

processus permettant de confirmer qu'une chambre est conforme à toutes ses exigences fonctionnelles, de performances et d'interfaces

[CEI 60050-394:2007, 394-40-42, modifiée]

**3.1.15****incertitude de champ intrinsèque<sup>3</sup>**

contribution au budget d'incertitude global provoquée par la nature (statistique) aléatoire du champ à l'intérieur d'une chambre réverbérante

NOTE Généralement, l'incertitude de champ intrinsèque est bien plus importante que l'incertitude de l'instrumentation de mesure dans des conditions de fonctionnement typiques d'une chambre réverbérante, sauf lorsque la chambre a un facteur de qualité exceptionnellement élevé. Ainsi, l'IFU est généralement la seule contribution ou la contribution principale à prendre en compte dans l'estimation de l'incertitude globale pendant un essai ou un mesurage.

**3.1.16****volume de travail**

région définie par 8 points à l'intérieur de la chambre à une distance suffisante des parois afin d'éviter les effets aux limites, pour des chambres de forme rectangulaire généralement définies par les angles d'une région de forme cubique ou parallélépipède à une distance équivalant à une longueur de quart d'onde par rapport aux parois les plus proches

NOTE Pour des fréquences inférieures à 1 GHz, les distances sont limitées à 0,75 m.

<sup>3</sup> Intrinsic field uncertainty (IFU)



### 3.2 Abréviations

AVF	Facteur de validation de l'antenne	Antenna Validation Factor
CVF	Facteur de validation de la chambre	Chamber Validation Factor
CDF	Fonction de distribution cumulative	Cumulative Distribution Function
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques	
CLF	Facteur de chargement de la chambre	Chamber Loading Factor
CW	Onde entretenue	Continuous Wave
EM	Electromagnétique	
CEM	Compatibilité électromagnétique	
EMI	Brouillage électromagnétique	Electromagnetic Interference
EUT	Matériel en essai	Equipment Under Test
CEI	Commission Electrotechnique Internationale	
IEEE		Institute of Electrical and Electronics Engineers
FI	Fréquence image	FI Image Frequency
IFU	Incertitude de champ intrinsèque	Intrinsic Field Uncertainty
IL	Perte d'insertion	Insertion Loss
ISO	Organisation internationale de normalisation	International Organization for Standardisation
LUF	Fréquence utilisable la plus faible	Lowest Usable Frequency
MIU		Measurement Instrumentation Uncertainty
MU		Measurement Uncertainty
OATS	Emplacement d'essai en espace libre	Open Area Test Site
PDF	Fonction de densité de probabilité	Probability Density Function
RC		Reverberation Chamber
RE	Emissions rayonnées	Radiated Emissions
RF	Radiofréquence	Radio Frequency
RMS	Valeur efficace	Root Mean Square
tr/s	révolutions par seconde	rps revolutions per second
RSS	Racine carrée de la somme des carrés	Root Sum of the Squares
Rx	Réception (antenne)	Receive (antenna)
SE	Efficacité de blindage	Shielding Effectiveness
SW	Modulation d'onde carrée	Square Wave Modulation
TFVF	Facteur de validation de l'installation d'essai	Test Fixture Validation Factor
Tx	Emission (antenne)	Transmit (antenna)

## 4 Généralités

La plupart des matériels électroniques sont, d'une manière ou d'une autre, affectés par des rayonnements électromagnétiques. Les sources de rayonnement peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et peuvent être intentionnelles ou non. Des exemples d'antennes intentionnelles sont les systèmes de communication personnels sans fil. Des exemples d'antennes non intentionnelles sont les soudeuses, les thyristors, les bus de données à grande vitesse, les éclairages fluorescents, les interrupteurs fonctionnant sur charges inductives, etc.

Les environnements réalistes de propagation des ondes électromagnétiques sont souvent caractérisés par des réflexions multiples et des effets de trajets multiples. Les chambres réverbérantes participent d'une certaine manière à la simulation extrême d'environnements complexes de ce type (effet le plus défavorable) et peuvent à cet égard être plus représentatives que d'autres méthodes d'essai CEM. Les chambres réverbérantes présentent



l'avantage de pouvoir générer un champ intérieur statistiquement isotrope, homogène, non polarisé et non corrélé, par l'action du brasseur.

Les champs électromagnétiques de niveau élevé sont générés facilement et en toute sécurité en utilisant des chambres réverbérantes. Le facteur de qualité élevé ou  $Q$  de ce type de chambres, permet la génération de champs relativement élevés avec des puissances d'entrée de niveau modéré (champs résonants). L'absence d'absorbant rend la génération des niveaux de champs élevés plus sûre dans la mesure où le risque d'enflammer les absorbants est éliminé. Un écran adéquat de l'enceinte confine les champs élevés à l'intérieur de la chambre.

## 5 Environnements d'essai et limitations

La méthode de la chambre de réverbération est adaptée pour réaliser les essais des niveaux de champs relativement faibles aux niveaux les plus élevés. En raison du niveau de séparation élevé avec l'environnement ambiant, les essais d'émission et d'immunité peuvent être réalisés pour la plupart des exigences commerciales sans limitations. Actuellement, la CEI fixe la fréquence de transition entre essais rayonnés et essais conduits à 80 MHz pour les essais d'immunité.

NOTE La CEI 61000-4-6 définit également les méthodes d'essai pour établir l'immunité des matériels électriques et électroniques à l'énergie électromagnétique conduite. Elle couvre les fréquences inférieures à 80 MHz.

Comme indiqué à l'Annexe A, la gamme de fréquences des essais est déterminée par la taille et la construction de la chambre, et par l'efficacité du ou des dispositifs mécaniques de brassage à modifier l'allure de champ spatial. Il n'existe aucune limite fondamentale concernant la forme et la taille des enceintes pouvant être utilisées comme chambres réverbérantes. Cependant, des propriétés réverbérantes correctes à une fréquence de fonctionnement spécifiée requièrent une taille de chambre minimale. On fait normalement fonctionner les chambres réverbérantes de la taille de pièces (par exemple volumes entre 75 m<sup>3</sup> et 100 m<sup>3</sup>) de 200 MHz à 18 GHz sans limitations. Le fonctionnement à moins de 200 MHz exige des chambres de taille supérieure au local blindé habituel.

## 6 Applications

### 6.1 Immunité rayonnée

L'utilisation de chambres réverbérantes pour réaliser les essais d'immunité rayonnée est traitée à l'Annexe D. Cette annexe couvre le montage d'essai, la validation de la chambre et les procédures d'essai. L'injection d'un niveau prédéterminé de puissance radioélectrique dans la chambre génère le champ désiré à l'intérieur de celle-ci. Ce niveau prédéterminé de puissance radioélectrique est déduit des données de validation de la chambre qui sont décrites aux Annexes B et C.

### 6.2 Emissions rayonnées

L'utilisation de chambres réverbérantes pour mesurer les émissions rayonnées est couverte par l'Annexe E. La méthode décrite mesure la quantité de puissance radioélectrique rayonnée par le matériel en essai à l'intérieur de la largeur de bande de mesure. Comme pour les essais d'immunité rayonnée, les données de validation de la chambre décrites aux Annexes B et C sont utilisées pour déterminer les niveaux d'émissions rayonnées.

### 6.3 Mesures de l'efficacité d'écran

Trois annexes sont dédiées à la réalisation des mesures d'efficacité d'écran. Les mesures d'efficacité d'écran des assemblages de câbles, des câbles, des connecteurs, des guides d'ondes et des composants passifs hyperfréquence sont décrites à l'Annexe F. L'Annexe G couvre l'efficacité d'écran des joints d'étanchéité et des matériaux. L'approche décrite à



L'Annexe G utilise une méthodologie dite de la «chambre imbriquée» (par exemple, une chambre réverbérante située à l'intérieur d'une chambre réverbérante plus grande). L'Annexe G couvre également la validation des aménagements d'essai qui sont généralement nécessaires pour réaliser les mesures de l'efficacité d'écran sur les joints d'étanchéité et les matériaux. Des différences mineures dans la conception/la construction des aménagements d'essai peuvent avoir une influence importante sur les résultats d'essai. Il est nécessaire que les matériaux des aménagements, l'espacement des boulons, les finitions de surface, les réglages de couple, etc. soient tous contrôlés afin d'obtenir des résultats reproductibles. En raison du grand nombre de variations qui seraient nécessaires pour couvrir les nombreux joints d'étanchéité et matériaux différents qui nécessitent une évaluation, cette annexe ne comporte pas de lignes directrices détaillées pour la conception des aménagements d'essai. L'Annexe H couvre les mesures d'efficacité d'écran des enceintes. Comme à l'Annexe G, la méthodologie décrite à l'Annexe H utilise l'approche de la «chambre imbriquée».

## 7 Matériels d'essai

Les types suivants de matériels d'essai sont recommandés:

- Chambre réverbérante: d'une taille adaptée pour maintenir un environnement électromagnétique multi-modes par rapport à la fréquence d'essai la plus faible. Ceci implique que les dimensions de la chambre dans toutes les directions doivent être importantes par rapport à la longueur d'onde.
- Dispositif(s) mécanique(s) de brassage (voir Annexe A): avec une dimension d'au moins un quart de longueur d'onde à la fréquence la plus faible. Il convient que chaque brasseur soit aussi grand que possible par rapport à la taille de la chambre globale, pour qu'une dimension soit au moins égale aux 3/4 de la dimension la plus faible de la chambre. En outre, il convient que chaque brasseur ait une forme asymétrique, de manière à obtenir une distribution de champ non répétitive sur une révolution du brasseur.
- Antennes émettrices (voir Annexe B): antenne log périodique ou toute autre antenne parfaitement adaptée répondant aux exigences de fréquence et de puissance, et évitant l'éclairage direct du volume d'essai.
- Antennes de champ de référence (voir Annexe B): système d'antenne log périodique ou tout autre système d'antenne à polarisation linéaire parfaitement adaptée, répondant aux exigences de fréquence.
- Sonde de contrôle de champ isotrope (voir Annexe B): capable de contrôler le champ électrique le long des trois axes orthogonaux. Tout circuit de tête de sonde et tout système optoélectronique doit avoir une immunité appropriée au champ à mesurer et une liaison à fibre optique avec l'indicateur situé à l'extérieur de la chambre. Il est également possible d'utiliser une liaison correctement filtrée.

NOTE 1 Les chambres réverbérantes exigent une sonde de champ qui permet la mesure du champ électrique de manière individuelle dans les trois axes orthogonaux. Si une petite antenne à un seul axe est utilisée, il est alors nécessaire de la repositionner pour mesurer chaque composante de champ séparément dans des directions différentes.

- Antenne de contrôle du champ qui est une petite antenne dipolaire (étalonnée) (c'est-à-dire, inférieure à  $0,1 \lambda$ ), qui peut remplacer la sonde sous réserve que l'antenne soit positionnée à trois orientations non coplanaires (mutuellement perpendiculaires de préférence) pour chaque emplacement de mesure. Il convient de veiller à maintenir l'équilibre de cette antenne par rapport à son câble d'alimentation.
- Filtres contre le brouillage électromagnétique: il convient de veiller à ce que les filtres n'introduisent pas d'autres effets de résonance sur les lignes connectées.
- Générateur(s) de signaux à fréquences radioélectriques capable(s) de couvrir la gamme de fréquences concernée et qui, s'il (s'ils) est (sont) utilisé(s) pour des essais d'immunité, peut (peuvent) être modulé(s) en amplitude par une onde sinusoïdale de 1 kHz avec un taux de modulation de 80 %. Ils doivent soit comporter une capacité de balayage automatique, soit, dans le cas des synthétiseurs RF, pouvoir être programmés par pas de fréquence et temps de palier. Ils doivent également pouvoir être réglés manuellement.

NOTE 2 Les comités de produits peuvent choisir des procédés alternatifs de modulation.



L'utilisation de filtres passe-bas ou passe-bande peut être nécessaire pour éviter des problèmes dus aux harmoniques sur les matériels de contrôle recevant les signaux.

- Amplificateurs de puissance: pour amplifier un signal (non modulé et modulé) et fournir à l'antenne la puissance nécessaire pour obtenir le niveau de champ nécessaire. Les harmoniques et la distorsion produits par l'amplificateur de puissance doivent se situer à un niveau inférieur ou égal à 15 dB en dessous du niveau de la porteuse.

**AVERTISSEMENT** – Des réflexions élevées sont présentes dans les essais en chambre réverbérante, et une protection de l'amplificateur peut être nécessaire contre la désadaptation d'impédance.

- Equipement associé pour enregistrer les niveaux de puissance nécessaire pour déterminer les limites d'émission ou l'intensité du champ et pour contrôler la génération de ce niveau pour les essais. Un coupleur directif peut être utilisé pour contrôler la puissance incidente.

NOTE 3 Il convient que toute spécification du type de récepteur à utiliser (par exemple, récepteur EMI spécifié dans la CISPR) soit déterminée par le comité de produits compétent.

On doit veiller à assurer une immunité appropriée des équipements auxiliaires.

## 8 Validation de la chambre

A la suite de la construction initiale de la chambre ou après toute modification majeure, une technique de validation de l'uniformité du champ fondée sur les performances, pour démontrer des performances de chambre réverbérante appropriées, est réalisée conformément à l'Annexe B. La procédure peut être utilisée pour déterminer la fréquence utilisable la plus faible (LUF) de la chambre employée. La procédure de validation de l'uniformité de champ de la chambre est réalisée sur un volume d'essai/de travail, qui inclut l'emplacement du banc d'essai et du matériel en essai (EUT) à l'intérieur de la chambre réverbérante. La validation de la chambre ne concerne que le fonctionnement en mode accordé (c'est-à-dire une rotation par pas du brasseur) de la chambre, tandis que le fonctionnement en mode brassé (rotation continue du brasseur) est traité de manière séparée à l'Annexe C. Il convient de réaliser la mesure de l'uniformité du champ après retrait de tous les équipements de support (y compris le banc d'essai) de la chambre réverbérante. La validation doit être réalisée à 8 emplacements suffisamment distants selon 3 axes individuels (x, y, z) à chaque emplacement d'essai, c'est-à-dire en 24 points de mesure au total par fréquence (B.1.2). Le champ à l'intérieur de la chambre est considéré comme uniforme si l'écart type se situe dans les limites de 3 dB au-dessus de 400 MHz, de 4 dB à 100 MHz décroissant linéairement jusqu'à 3 dB à 400 MHz, et dans les limites de 4 dB en dessous de 100 MHz.

La technique de validation nécessite l'utilisation d'antennes de contrôle à champ linéaire/passif au cours des essais des matériels. Les antennes sont étalonnées par rapport à un capteur de champ  $E$  à 3 axes (étalonné dans un environnement anéchoïque, par exemple, conformément à l'Annexe I de la CEI 61000-4-3, valable pour la validation de la chambre). Le but de cet aspect de la procédure est de permettre le contrôle continu du champ au cours de l'essai avec une antenne et un matériel de contrôle associé ayant un temps de réponse rapide.

NOTE 1 La dynamique sur laquelle il convient qu'une sonde de champ présente une réponse linéaire est bien plus importante dans une chambre réverbérante que dans d'autres installations d'essai. Ceci a pour origine le caractère résonant de son champ intérieur, qui provoque de grandes variations du champ en tout point à l'intérieur du volume de travail en fonction de l'angle de rotation du brasseur, généralement de 30 dB ou plus.

NOTE 2 Il convient que la linéarité de la sonde utilisée pour la validation de la chambre soit de  $\pm 0,5$  dB par rapport à une réponse linéaire idéale dans une plage de  $[-6$  dB,  $+10$  dB] par rapport à l'intensité de champ moyenne. L'asymétrie de cet intervalle est due à l'asymétrie correspondante de la fonction de densité de probabilité du champ à l'intérieur d'une chambre réverbérante, qui favorise des intensités de champ plus élevées. Pour le contrôle du champ pendant les essais d'immunité, cette plage s'applique par rapport à la valeur moyenne de l'intensité de champ maximale.

**AVERTISSEMENT** La sensibilité de l'électronique de commande associée à la sonde (unité de mesure) au champ local à l'intérieur de la chambre réverbérante constitue une question particulière de l'utilisation des sondes de



champ. Des valeurs de champ local élevées peuvent provoquer un mauvais fonctionnement ou des valeurs mesurées de manière imprécise par la sonde. Ceci nécessite d'effectuer l'étalonnage de la sonde par une exposition de l'unité de mesure complète de la sonde (et non pas simplement ses éléments sensibles) à l'intensité de champ maximale prévue dans la chambre lors de sa validation et/ou des essais en chambre.

De plus, une vérification de l'impact de la charge de la chambre sur l'uniformité de champ est réalisée (B.1.6), ceci pour déterminer la charge maximale acceptable de la chambre en vue des essais ultérieurs.

Avant le début de chaque essai, avec le banc d'essai et le matériel en essai installés dans la chambre, la procédure suivante est appliquée:

- Une mesure de «vérification rapide» des performances de la chambre est réalisée avec le matériel à soumettre aux essais et avec le banc d'essai installés dans la chambre (Article B.2). Cet essai est destiné à confirmer que la charge de la chambre est inférieure à celle simulée au cours de la validation initiale de la chambre.
- Les calculs fondés sur les mesures de validation sont utilisés pour déterminer la largeur minimale d'impulsion (Article B.3) qui peut être soutenue dans une chambre donnée pour les essais de modulation en impulsion.

NOTE 3 La validation de la chambre détaillée à l'Article B.1 est nécessaire uniquement après la construction initiale de la chambre réverbérante, et après une modification importante de celle-ci. La vérification de la charge maximale de la chambre (Paragraphes A.5.4, B.1.5) est nécessaire uniquement après la construction initiale de la chambre réverbérante, ou après des modifications importantes de celle-ci. Les changements apportés aux brasseurs sont considérés comme des modifications importantes si ces dernières donnent lieu à une réduction de l'efficacité du brasseur comme indiqué à l'Article A.3.

## 9 Essais

Le montage et les procédures d'essai dépendent du type d'essai réalisé. Se référer à l'annexe qui concerne le type d'essai réalisé pour déterminer les exigences d'essai pour un essai spécifique.

Se référer à l'annexe qui concerne le type de méthodologie d'essai désiré (c'est-à-dire, à brassage de modes pas à pas ou continu). Pour les lignes directrices concernant l'applicabilité du brassage de modes pas à pas par rapport au brassage de modes continu, se référer aux Annexes A et C.

## 10 Résultats d'essai, rapport d'essai et conditions d'essai

Les essais doivent être réalisés conformément à un plan d'essai qui doit être inclus dans le rapport d'essai.

Les résultats d'essai et les exigences concernant le rapport dépendent du type d'essai réalisé. Se référer à l'annexe qui concerne le type d'essai réalisé pour déterminer ce qu'il est nécessaire d'inclure dans le rapport d'essai.

Sauf spécification contraire dans le plan d'essai, les essais doivent être réalisés dans les conditions climatiques normales conformément à la CEI 60068-1.

NOTE La génération d'intensités de champ élevées peut produire des effets calorifiques locaux importants ou des arcs tout aussi importants dans les cas extrêmes.



## **Annexe A** (informative)

### **Vue d'ensemble de la chambre réverbérante**

#### **A.1 Remarques préliminaires**

##### **A.1.1 Généralités**

Les recherches concernant les chambres réverbérantes électromagnétiques ont été menées depuis plus de 50 ans [1 à 5]<sup>4</sup> (voir [6 à 8] pour les études) et ont permis une meilleure compréhension des méthodes de fonctionnement et d'analyse [8 à 11]. Bien qu'à l'origine, ces recherches aient été destinées à mesurer l'absorption électromagnétique des matériaux [1 à 3], le domaine d'application a été étendu pour inclure les émissions rayonnées [4, 30], les essais de susceptibilité des matériels électroniques [5, 30], les essais d'immunité et l'efficacité d'écran des câbles, des connecteurs et des enceintes [31]. Les chambres réverbérantes peuvent également être utilisées pour caractériser certains paramètres d'antenne et de propagation.

##### **A.1.2 Taille, forme, construction et fonctionnement de la chambre**

Une chambre réverbérante est une cavité ou une chambre, électriquement de grande taille et à conductivité élevée, équipée d'un mécanisme de modification (brassage) de ses modes, et utilisée pour réaliser les mesures électromagnétiques (à la fois d'émissions et d'immunité) sur les matériels électroniques. Toute installation qui correspond à cette description peut être considérée comme une chambre réverbérante (également appelée chambre à brassage de modes, pas à pas ou continu, ou cavité à mode continu). Cependant, il peut se révéler nécessaire de satisfaire à d'autres conditions avant qu'une telle installation puisse être utilisée avec une incertitude faible acceptable.

En général, une chambre réverbérante est une enceinte de protection dont la plus petite dimension est grande par rapport à la longueur d'onde à la fréquence utilisable la plus faible (LUF, voir A.1.3). Elle doit également être suffisamment importante pour s'adapter au matériel en essai, aux brasseurs et aux antennes de mesure. La chambre est normalement équipée d'un dispositif mécanique de brassage dont les dimensions constituent une partie significative des dimensions de la chambre et de la longueur d'onde à la fréquence utilisable la plus faible (voir A.1.4). Lorsque la chambre est excitée avec une énergie radioélectrique, l'environnement électromagnétique multi-modes qui en résulte peut être «brassé» par le brasseur mécanique. Le champ qui en résulte est statistiquement uniforme et isotrope (signifiant que l'énergie est arrivée de tous les angles d'exposition), de même que statistiquement et aléatoirement polarisé (c'est-à-dire avec toutes les directions de polarisation possibles), lorsqu'on établit une moyenne sur un nombre suffisant de positions du brasseur. Par «nombre suffisant,» on entend le nombre de pas du dispositif de brassage nécessaires pour donner l'uniformité de champ spécifiée.

Il n'est pas pratique de définir une chambre d'essai de taille minimale, et la fourniture de lignes directrices pour la conception détaillée ne relève pas du domaine d'application de la présente norme. Le facteur critique est tel que si une chambre satisfait à la procédure de validation (voir B.1.2), ceci démontre qu'elle fournit l'environnement électromagnétique exigé au niveau de confiance statistique désiré.

Toutes les mesures de puissance sont normalement effectuées par rapport aux bornes de l'antenne. Ainsi, la puissance d'entrée de la chambre ( $P_{\text{Entrée}}$ ) est prise comme étant la puissance incidente délivrée aux bornes de l'antenne. Dans certains cas, il est nécessaire de prendre en compte la puissance réfléchie causée par la désadaptation induite par

<sup>4</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article A.6. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



l'antenne/l'excitation. Dans de tels cas, la puissance d'entrée doit être la puissance d'entrée résultante qui est égale à (en unités linéaires, par ex. W):

$$P_{\text{résultante}} = P_{\text{incidente}} - P_{\text{réfléchi}} \quad (\text{A.1})$$

### A.1.3 Fréquence utilisable la plus faible (LUF)

La taille, la forme et le facteur de qualité de la chambre, et l'efficacité du brasseur mécanique, déterminent la fréquence utilisable la plus faible. La LUF est généralement définie comme la fréquence à laquelle la chambre satisfait aux exigences de fonctionnement. Dans la pratique, pour les critères établis dans la présente norme, cette fréquence apparaît généralement à une fréquence légèrement supérieure à trois fois la première résonance de la chambre. Pour la procédure décrite dans la présente norme, la LUF est la fréquence la plus faible à laquelle l'uniformité de champ spécifiée peut être obtenue, sur un volume délimité par 8 emplacements d'angle.

### A.1.4 Facteur de qualité (Q) de la chambre

Le facteur de qualité permet de mesurer la capacité d'une chambre ou d'une cavité à stocker l'énergie par rapport à son taux de dissipation. La capacité d'une chambre à stocker l'énergie est déterminée par la fréquence, le volume (et dans une moindre mesure la forme) et les pertes électromagnétiques présentes dans la chambre. Le mécanisme de perte importante dans une chambre vide (c'est-à-dire en l'absence de matériel en essai) est dû aux parois de la chambre et aux antennes. D'autres pertes peuvent se produire suite à la fuite effective par des ouvertures non intentionnelles ou une charge intentionnelle. Plus la conductivité des matériaux utilisés pour construire les parois de la chambre est élevée et plus les ouvertures sont petites, plus les pertes de la chambre sont faibles. Les matériaux comme les feuilles d'argent, de cuivre et d'aluminium offrent la conductivité la plus élevée et donc les pertes ohmiques les plus faibles. D'autres matériaux comme les feuilles d'acier nues ou peintes ou les feuilles galvanisées sont aussi courants. Pour des cavités microondes miniatures, des matériaux supraconducteurs à de faibles températures peuvent être envisagés si des valeurs Q exceptionnellement élevées sont désirées.

Les écrans en cuivre, en aluminium et en métal projeté cependant possèdent des zones de grande surface et ne donnent pas des environnements avec un facteur Q de valeur élevée. Des pertes additionnelles telles que celles dues aux antennes, aux structures de support et au matériel en essai, peuvent également affecter la valeur Q globale de la chambre.

La contribution des pertes ohmiques dans une antenne est souvent suffisamment faible pour être négligeable, comme décrit dans cet article (voir Annexe I). La quantité de puissance nécessaire pour générer un champ spécifique à l'intérieur d'une chambre peut être déterminée à partir de la procédure de validation de la chambre vide indiquée à l'Annexe B. Cependant, le matériel en essai, l'équipement support requis, ou tout matériau absorbant présent, peut charger la chambre, réduire la valeur Q de la chambre, et ainsi réduire les champs d'essai pour la même puissance d'entrée. Par conséquent, les champs dans une chambre chargée doivent être contrôlés et la puissance d'entrée doit être augmentée, si nécessaire, pour compenser cette charge comme décrit à l'Article B.2 (7).

### A.1.5 Considérations relatives au brasseur

Des techniques existent, autres que l'utilisation des dispositifs mécaniques de brassage, qui permettent également d'obtenir un environnement statistiquement uniforme et isotrope. Les exemples incluent les parois déformables ou les limites mobiles, les antennes d'émission ou de réception ou matériels en essai mobiles, et le changement de la fréquence sur une largeur de bande (variation de fréquence audio unique (balayage) ou excitation de bruit à largeur de bande limitée), ou une combinaison de ces éléments. Alors que ces techniques peuvent produire un essai valable, la présente norme suppose que la configuration actuelle de la chambre comporte au moins un brasseur tournant. Certaines méthodes de brassage, parmi les méthodes de brassage alternatives mentionnées, peuvent ne pas s'appliquer à certains essais CEM, par exemple, le brassage de la fréquence ne peut pas être utilisé dans les



essais d'émissions. L'utilisation combinée de différentes techniques de brassage (communément appelée brassage hybride) peut faciliter l'obtention d'incertitudes réduites dans une chambre donnée, ou permettre pour des chambres plus petites un niveau d'incertitude donné.

Il convient que les brasseurs soient appropriés pour fournir l'uniformité de champ désirée. Il convient d'éviter les symétries de conception et de mise en place du brasseur afin de maximiser le nombre maximal de positions indépendantes que celui-ci peut générer. Une méthode d'évaluation des performances des brasseurs est donnée à l'Article A.3.

Dans certaines chambres, il peut être nécessaire d'utiliser des brasseurs multiples pour obtenir l'uniformité de champ désirée aux fréquences exigées.

Les moteurs pas à pas ou les servomoteurs à codeur à commande par ordinateur sont recommandés. Les moteurs continus à vitesse variable avec mécanisme à courroie sont acceptables, mais le temps de réponse du matériel en essai doit toutefois être rapide par rapport à la vitesse du brasseur pour que cette option soit viable, la localisation de la position de la roue à pales pouvant toutefois être moins précise ou reproductible. Il convient de vérifier tout brouillage électromagnétique possible par le moteur lors de la mise en service de la chambre.

Dans le passé, les essais étaient effectués avec un nombre fixe d'échantillons ou de pas du dispositif de brassage (généralement 200) à toutes les fréquences considérées [5]. Ceci donnait lieu à des incertitudes (c'est-à-dire un manque d'homogénéité et d'anisotropie statistiques) dans le champ, qui variaient en fonction de la fréquence en raison de l'augmentation de la densité modale (voir A.2.1) aux fréquences plus élevées. Comme représenté à la Figure A.1, l'incertitude d'une chambre type variait de manière considérable en fonction de la fréquence dans ce cas.

La procédure développée pour la présente norme optimise le nombre de pas ou d'échantillons pour obtenir un niveau donné d'incertitude (c'est-à-dire l'écart-type de l'uniformité du champ, spécifié ici en termes du champ maximal mesuré) en fonction de la fréquence. Ceci permet de réduire le nombre d'échantillons conjointement à une augmentation de la fréquence. La procédure fournit une méthode précise et économique pour la validation des chambres réverbérantes. Elle permet à un opérateur de régler le nombre de pas du brasseur générés pour obtenir l'incertitude du niveau désiré, ainsi que d'augmenter au maximum la capacité de la chambre à générer des champs de valeur élevée en augmentant le nombre de pas des brasseurs dans toute la mesure du possible.

#### **A.1.6 Remarques générales concernant la validation de la chambre**

La procédure de validation impose une exigence sévère concernant les champs moyennés dans le temps (c'est-à-dire selon une moyenne d'ensemble) [9, 10, 16] générés dans le volume d'essai pour être uniformes, selon une incertitude spécifiée. Pour s'assurer que cette exigence est satisfaite, trois mesures sont nécessaires à chacun des huit emplacements en utilisant trois orientations perpendiculaires entre elles. Chaque mesure est indépendante, ce qui donne au total 24 mesures par fréquence. Une chambre qui passe avec succès la procédure de validation aura démontré sa capacité à générer l'uniformité de champ exigée au niveau d'incertitude accepté.

#### **A.1.7 Disposition des câbles**

En règle générale, pour des câbles reliés à un matériel en essai, les résultats d'essai ne sont pas fonction de la disposition de ces derniers en raison de l'homogénéité de champ statistique. Des lignes directrices spécifiques concernant la disposition des câbles, si nécessaire, sont fournies dans les annexes appropriées.



## A.2 Théorie des cavités

### A.2.1 Modes de cavité, densité de mode et largeur de bande du facteur Q

Un mode de cavité (également appelé mode propre ou mode naturel), comme défini en 3.1.12, est une répartition de champ particulière générée par des ondes stationnaires. Les modes dans une cavité sont régis par les conditions aux limites (forme et taille de la cavité et du brasseur de mode). Pour une cavité rectangulaire théorique, sans pertes, vide et fermée, de dimensions  $L$  (longueur),  $W$  (largeur) et  $H$  (hauteur), on peut représenter les fréquences des modes ou de résonance  $F_{l,m,n}$ , en MHz, comme suit:

$$F_{l,m,n} = 150 ((l/L)^2 + (m/W)^2 + (n/H)^2)^{0,5} \quad (\text{A.2})$$

où

$l, m$ , et  $n$  sont les indices de mode (dont au moins deux ne sont pas nuls), et  
 $L, W$ , et  $H$  sont les dimensions de la chambre (en m).

La Figure A.2 montre la distribution théorique de modes en fonction de la fréquence pour une chambre rectangulaire de 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m ( $L \times W \times H$ ). Chaque mode représente une variation unique du champ (structure modale) en fonction de l'emplacement spatial dans la cavité. La fréquence de résonance la plus faible de cette chambre ( $F_{1,1,0}$ ) est de 32,096 MHz. Les pertes éventuelles ont tendance à réduire légèrement les fréquences de résonance. Chaque mode a son propre facteur Q modal  $Q_{l,m,n}$ . Les valeurs modales de Q augmentent approximativement avec la racine carrée de la fréquence. Un facteur Q «efficace» d'une cavité en sur-mode peut être défini comme une moyenne pondérée des modes excités [28]. La largeur de bande du facteur de qualité  $BW_Q$ , de la cavité est définie comme  $F_{l,m,n}/Q$  aux points de 3 dB d'une caractéristique de résonance de second ordre. Une largeur de bande  $BW_Q$  représentative est illustrée à la Figure A.3 à une valeur  $F_{4,2,2}$  (le 60<sup>ème</sup> mode). Dans ce cas, seuls quelques modes sont excités lorsque la cavité est utilisée par une source CW à la valeur  $F_{4,2,2}$ .

La Figure A.4 montre l'effet de réduction du facteur Q de la cavité (voir A.1.3 et A.5.7). Dans ce cas, des modes additionnels peuvent être excités lorsque la cavité est utilisée à la fréquence du 60<sup>ème</sup> mode en raison du chevauchement modal dû à un facteur Q inférieur et à un espacement de fréquences réduit. La structure modale efficace est la somme vectorielle des modes excités pondérés à différentes amplitudes. La variation du champ spatial sera à présent différente de celle obtenue avec la cavité de valeur Q supérieure. Ainsi, faire varier la valeur Q de la cavité peut modifier la structure modale «efficace». Noter que si la fréquence était augmentée, un plus grand nombre de modes seraient disponibles dans une  $BW_Q$  donnée, générant ainsi une structure plus fine du champ. De nouveau, la structure modale efficace serait la somme vectorielle des modes.

Les Figures A.3 et A.4 montrent qu'aux fréquences inférieures, la population modale d'une chambre est clairsemée, avec des intervalles de fréquences de taille différente (non uniformes d'un point de vue spectral). Ces figures montrent également qu'en augmentant la fréquence, le nombre et la densité des modes augmentent en moyenne (proportionnellement à  $f^3$  et  $f^2$ , respectivement). La structure modale efficace combinée à la capacité du brasseur à modifier les conditions aux limites de la chambre, détermine la manière dont la chambre fonctionnera.

NOTE Une chambre peut avoir une forme géométrique arbitraire. Toutefois, certaines formes, par exemple sphériques, circulaires ou cylindriques, ne sont en principe pas utilisées pour les chambres réverbérantes, parce que les surfaces courbes sont susceptibles de produire des caustiques (focalisation du rayonnement), rendant difficile l'obtention d'une uniformité spatiale de champ, à moins qu'elles ne soient fournies avec des diffracteurs suffisamment grands par rapport à la longueur d'onde [12, 13] ou si on évite la région focale.

La structure modale efficace dépend à la fois de la densité de mode et de la largeur de bande du facteur de qualité à la fréquence considérée. La densité de mode à la fréquence  $f$  est  $m = 8\pi V f^2 / c^3$ . Pour une fréquence du premier ordre, la valeur de  $m$  ne dépend pas de la forme de la cavité [11]. Cependant, les corrections du second ordre qui dépendent de la courbure des surfaces et de la longueur des arêtes et des joints [12] peuvent devenir



importantes à des fréquences inférieures. Le nombre de modes,  $M$ , excités à la valeur  $BW_Q$  à la fréquence  $f$  peut être estimé sous la forme

$$M = m \times BW_Q = \frac{8\pi V f^3}{c^3 Q} \quad (\text{A.3})$$

où

$f$  est la fréquence (en Hz),

$c$  est la vitesse de la lumière, approximativement  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ,

$V$  est le volume de cavité (en  $\text{m}^3$ ),

$Q$  est le facteur de qualité (adimensionnel) à la fréquence  $f$ .

Plus généralement, le nombre de modes dans une largeur de bande de réception  $\Delta f$  pour un signal d'excitation à ondes non entretenues (par exemple, pulsé) à large bande peut être estimé comme étant  $m\Delta f$ , où  $\Delta f \geq BW_Q$ .

### A.2.2 Performances idéales de la chambre par rapport à des performances imparfaites – Influence sur l'incertitude de champ

La théorie suggère qu'une condition de «sur-mode» existe lorsqu'un nombre suffisant de modes sont excités. Dans une condition idéale de sur-mode et dans le cadre d'un processus de brassage suffisamment efficace, la distribution de puissance en tout point correspond à une distribution en Khi carré ( $\chi^2$ ), l'intensité du champ correspondant pour sa part à une distribution en Khi ( $\chi$ ) [10, 11, 23]. Les deux distributions sont particulièrement asymétriques aux environs de leur valeur moyenne (extrémité droite importante). A des densités de modes (finis) inférieures, c'est-à-dire à des fréquences inférieures, la distribution de la puissance reçue ne correspond plus à une distribution en Khi carré ( $\chi^2$ ) mais davantage à une distribution plus compliquée [14, 15]. De même, des distributions et des statistiques différentes s'appliquent à des champs proches d'une limite conductrice, appropriée à des dispositifs au sol ou à montage mural [16-18], ou pour des distributions d'échantillonnage empiriques lorsque le nombre de positions du brasseur générées  $n$  (voir l'Article A.3) est relativement faible, généralement lorsque  $n < 30$  [27]. Ces différences de distributions de champ accroissent l'incertitude et la largeur des intervalles de confiance du champ mesuré. Elles affectent également l'intensité de champ maximale ou minimale moyenne et ses intervalles de confiance.

## A.3 Evaluation de l'efficacité du brasseur

Afin d'appliquer des statistiques aux données obtenues d'une chambre réverbérante, le nombre d'échantillons indépendants doit être connu. Pour une fréquence donnée, un (ou plusieurs) brasseur doit modifier suffisamment les conditions aux limites pour déclencher un changement statistiquement significatif dans l'allure de champ de la chambre. Après un tel changement dans la structure de champ, tout échantillon obtenu à partir des champs, provenant de la nouvelle position du brasseur est dit statistiquement indépendant de ceux de la position antérieure du brasseur. Les données de performances du brasseur doivent être obtenues pour déterminer le nombre d'échantillons statistiquement indépendants qu'un ou plusieurs brasseurs donnés peuvent fournir à une fréquence désirée. Les données de performances du brasseur sont obtenues en enregistrant la puissance reçue à  $n$  intervalles angulaires régulièrement espacés sur une rotation du brasseur. La performance du brasseur peut alors être estimée en calculant le coefficient de corrélation entre les pas du brasseur [20]. Les coefficients de corrélation applicables à des multiples de pas de brasseur unique se combinent selon la fonction d'auto-corrélation compte tenu de la taille des pas du brasseur. Un calcul de coefficient de corrélation type implique de décaler de façon consécutive le vecteur de données  $x$  d'un échantillon pour chaque pas du brasseur, afin de produire  $y$  comme indiqué ci-dessous en considérant un ensemble total de 450 échantillons:

D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D450



D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D449

D449, D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D448

D448, D449, D450, D1, D2, D3, D4, D5, D6, ..... , D447

Le coefficient de corrélation  $r$  peut alors être calculé en utilisant la formule suivante:

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - u_x)(y_i - u_y)}{\sqrt{\left( \frac{\sum_i^n (x_i - u_x)^2}{n-1} \right) \left( \frac{\sum_i^n (y_i - u_y)^2}{n-1} \right)}} \quad (\text{A.4})$$

$\uparrow$   
 $\sigma_x^2$

$\uparrow$   
 $\sigma_y^2$

dans laquelle  $y_i$  est la même distribution que  $x_i$ , mais décalée d'un échantillon pour chaque pas du brasseur et  $n$  est le nombre d'échantillons pris sur une rotation du brasseur.

NOTE 1

- $x_i$  et  $y_i$  sont des valeurs de puissance reçues. L'utilisation de valeurs d'intensité de champ, de champ en phase ou de champ en quadrature en lieu et place de valeurs de puissance, donne généralement des valeurs similaires mais sensiblement différentes de  $r$ .
- $u_x$  et  $u_y$  sont des moyennes de la puissance originale reçue par rapport à l'ensemble des données de positions du brasseur.

Dans la mesure où la distribution  $y$  est la même que la distribution  $x$

$$u_y = u_x \text{ et } \sigma_x = \sigma_y$$

Le coefficient de corrélation  $r$  peut être obtenu en utilisant la fonction de corrélation intégrée à la plupart des tableurs sur la base de l'ensemble des données originales et l'ensemble des données décalées. Par convention, dans la présente norme, les données sont considérées comme non corrélées lorsque la valeur de l'amplitude du coefficient de corrélation faite pour augmenter les décalages chute en dessous, et reste inférieure, à la valeur  $1/e \approx 0,37$ . D'autres critères ou valeurs de seuil sont parfois utilisées dans d'autres applications. En raison de la nature statistique du coefficient de corrélation, cette valeur de seuil est valable uniquement dans le cas d'un nombre infini  $n$ . Pour tout nombre fini  $n$ , et tout niveau de confiance donnés, la limite doit être réduite [21]. Par exemple, pour un niveau de confiance de 95 % et des valeurs de  $n$  non inférieures à 100, le seuil du coefficient de corrélation peut être calculé de manière approchée par l'équation

$$r \approx 0,37 \times \left( 1 - \frac{7,22}{n^{0,64}} \right) \quad (\text{A.5})$$

Diviser le nombre total d'échantillons sur une rotation complète (par exemple 450 comme ci-dessus) par le nombre de pas nécessaires pour réduire le coefficient de corrélation à moins de 0,37 (ce que l'on appelle décimation) donne une estimation du nombre d'échantillons indépendants que le brasseur peut fournir à une fréquence particulière.

**EXEMPLE** Réaliser la procédure ci-dessus sur une chambre en faisant effectuer au brasseur mécanique une rotation de 360° en 450 pas régulièrement espacés à 80 MHz, 100 MHz et 500 MHz. Si  $r$  est inférieur à  $0,37 \times (1 - 7,22/450^{0,64}) = 0,32$  après, respectivement, 25, 15, et 5 pas du brasseur, on peut alors supposer que le brasseur délivre 18 échantillons indépendants



à une fréquence de 80 MHz, 30 échantillons à 100 MHz et 90 échantillons à 500 MHz. Comme cela est montré à l'Article A.4, le nombre de pas du brasseur requis peut dépasser la capacité d'un brasseur unique à fournir lesdits pas. Dans de tels cas, un deuxième brasseur, bien que nécessaire, n'est pas forcément suffisant.

NOTE 2 L'Equation (A.5) a été obtenue à partir de l'ajustement aux données numériques [21].

NOTE 3 La procédure décrite ci-dessus implique l'utilisation de positions de brasseur équidistantes. Ceci fonctionne très bien pour des fréquences suffisamment élevées et pour un brasseur unique. Il n'est pas possible de définir des positions de brasseur équidistantes pour deux brasseurs ou plus. Des symétries du brasseur peuvent se révéler appropriées à proximité de la LUF de la chambre. Dans ce cas, il n'est pas garanti que des positions équidistantes du brasseur ne soient pas corrélées, un ensemble de positions du brasseur devant par ailleurs être déterminé lorsque chaque corrélation de paires est inférieure à la limite susmentionnée. Cette procédure est également applicable dans le cas de plusieurs brasseurs. Une description détaillée de la procédure est envisagée. Pour des positions du brasseur non équidistantes à de basses fréquences, les positions réelles qui assurent une indépendance statistique peuvent dépendre de l'emplacement et de l'orientation des antennes et, pendant les essais, de la taille et de l'emplacement du matériel en essai.

## A.4 Statistiques de chambre réverbérante

### A.4.1 Variations de champ

Pour la discussion qui suit, on part de l'hypothèse que les dimensions de la chambre sont importantes lorsqu'on les compare à la longueur d'onde d'excitation (la chambre est en sur-mode), et que la chambre a une géométrie complexe. L'introduction d'antennes et de brasseurs efficaces assure la complexité dans une cavité par ailleurs régulière.

La procédure de validation applicable à la présente norme est basée sur la nature statistique des champs dans des cavités complexes. Des expériences ont permis de valider le fait que les champs variables dans une chambre réverbérante peuvent être modélisés de manière théorique en appliquant les distributions statistiques appropriées, par exemple, [9, 10, 14 et 15, 18] pour (1) la puissance reçue par une antenne qui est liée à la densité de puissance scalaire de la chambre et au carré du champ électrique (intensité du champ), (2) la puissance maximale reçue ou le carré du champ électrique maximal reçu, (3) une composante rectangulaire du champ électrique et (4) le maximum de la composante rectangulaire du champ électrique. Ces quatre distributions sont différentes mais néanmoins rattachées. Des distributions applicables à leurs moyennes d'échantillonnage, écarts-types et valeurs maximales [19], ainsi qu'aux petits ensembles d'échantillons indépendants [27] sont également disponibles. La désadaptation de l'impédance et d'autres problèmes liés aux mesurages affectent par ailleurs les statistiques de champ [19]. Certaines propriétés spécifiques de certaines distributions sont traitées ci-dessous.

La fonction d'une chambre réverbérante est de générer un environnement d'essai statistiquement uniforme (c'est-à-dire statistiquement isotrope, homogène et uniformément polarisé), dans des limites d'incertitude et de confiance acceptables. Ceci est réalisé par un dispositif mécanique de brassage, qui est utilisé pour redistribuer (diffuser) l'énergie du champ. Le brasseur modifie les conditions aux limites à l'intérieur de la chambre lorsqu'il est déplacé ou qu'il subit des rotations. Une fois que le brasseur a été déplacé en un nombre suffisant de positions indépendantes, les variations de champ qui résultent de cette rotation fournissent un ensemble de valeurs de champ couvrant de nombreuses directions de propagation et de polarisation. Quel que soit l'emplacement, le champ local montre des variations importantes et irrégulières lors de la rotation, en raison de différents niveaux d'interférence constructive ou destructive d'ondes réfléchies (vecteurs de phase) provenant de différentes directions spatiales d'incidence et de polarisation à cet emplacement. L'amplitude et la direction des champs sont en moyenne les mêmes, dans des limites d'incertitude bornées, pour tous les points à l'intérieur de la chambre. Les termes «isotrope» et «homogène» sont souvent utilisés pour faire référence à l'environnement généré par une chambre réverbérante. Ce terme est quelque peu trompeur, dans la mesure où le champ ou l'énergie dans l'environnement ne présente pas une amplitude égale venant de toutes les directions et polarisations simultanément, de même que la densité d'énergie n'est pas égale à tous les emplacements simultanément, d'où l'emploi de l'adjectif « statistique ».



On doit limiter la discussion aux champs à l'intérieur du volume de travail de la chambre. Le volume de travail est défini par des points ou des surfaces imaginaires à une distance de  $\lambda/4$  à partir des parois de la chambre et de toute antenne, de tout brasseur, ou de tout autre objet conducteur à la fréquence de fonctionnement la plus faible. Pour une chambre qui fonctionne au-delà de 100 MHz, la distance est de 0,75 m. Une installation de chambre réverbérante type est représentée à la Figure A.5.

#### A.4.2 Nombre requis d'échantillons indépendants

Compte tenu de la distribution des champs à l'intérieur d'une cavité, le nombre d'échantillons qui doit être pris pour déterminer le niveau d'incertitude du champ peut être déterminé. La Figure A.6 représente une prévision théorique pour le nombre d'échantillons indépendants (modifications des conditions aux limites ou pas des dispositifs mécaniques de brassage), nécessaires pour obtenir une incertitude de champ de 6 dB avec un niveau de confiance de 95 % pour une cavité spécifique dont les dimensions sont comme indiqué à la figure. Comme le montre la Figure A.6, pour un nombre de mode inférieurs  $M$ , tel que le définit l'Equation (A.3), le nombre requis d'échantillons indépendants augmente rapidement à mesure de la baisse de la fréquence. Dans ce calcul, le champ est en sous-mode et ne respecte plus une distribution khi idéale, mais une distribution plus compliquée [15], [27], régie par un paramètre supplémentaire dépendant du nombre maximal réalisable de positions indépendantes du brasseur à la fréquence de fonctionnement choisie, qui à son tour dépend de la forme et de la taille de la chambre. Si le niveau de confiance est abaissé, le nombre d'échantillons nécessaires pour obtenir le même niveau d'incertitude est alors réduit. En pratique, le dispositif mécanique de brassage peut ne pas être capable de fournir le nombre d'échantillons indépendants nécessaires pour assurer la performance désirée dans une cavité donnée. Pour cette raison, il convient d'évaluer les performances du brasseur comme cela est détaillé à l'Article A.3 pour déterminer le nombre d'échantillons, qui peuvent être délivrés dans une cavité donnée à une fréquence donnée.

#### A.4.3 Effet du brasseur sur le champ moyen

Pour une chambre réverbérante idéale, la valeur moyenne en volume (c'est-à-dire spatiale) du champ pour une condition aux limites fixe et une moyenne d'«ensemble», sont équivalentes [9, 10, 16]. Une moyenne d'ensemble est la moyenne du champ à un emplacement fixe pour des conditions aux limites multiples. Les changements des conditions aux limites sont généralement réalisés par la rotation d'un dispositif de brassage mécanique, mais peuvent également intervenir suite à des changements dans la configuration des objets tels que les antennes, les dispositifs d'essai, et les instruments et équipements de support.

La Figure A.7 montre la fonction de densité de probabilité (PDF) du champ à un emplacement à l'intérieur d'une chambre réverbérante idéale normalisée par le «vrai» volume ou la «vraie» moyenne d'ensemble (valeur attendue). Comme cela est représenté dans cette figure, le champ dans la chambre en un emplacement arbitraire et pour des conditions aux limites uniques fixes, ou à un emplacement unique fixe et pour des conditions aux limites arbitraires (position du brasseur) ( $N = 1$ ), peut varier de plus de 30 dB.

La Figure A.8 montre que, lorsque le nombre de conditions aux limites indépendantes (pas du brasseur) est augmenté, la moyenne mesurée du champ « de chambre » à tout emplacement dans la chambre, converge vers la valeur moyenne d'ensemble «vraie». La valeur moyenne mesurée est la «valeur attendue» d'échantillons multiples. La largeur de chaque courbe est une mesure de la répartition des valeurs de champ (intervalle d'incertitude), qui peut être attendue à un emplacement arbitraire dans le volume de travail pour  $N$  échantillons. L'incertitude du champ moyen est réduite sous la forme  $1/\sqrt{N}$  [19]. La Figure A.8 montre également que pour 12 pas du brasseur, l'incertitude du champ moyen est d'environ 5 dB avec l'intervalle de confiance de 95 %, et d'environ 2,4 dB pour 100 pas du brasseur. Ceci correspondrait à une augmentation octuple du temps d'essai pour une réduction de 2,6 dB de l'incertitude du niveau de champ moyen.



#### A.4.4 Effet du brasseur sur le champ maximal de chambre

Pour  $N = 1$  la distribution représentée à la Figure A.7 est valable à la fois pour les champs moyen et maximal, car les valeurs maximale, minimale et moyenne mesurées à un emplacement ont toutes la même valeur, pour une position fixe du brasseur. La fonction de densité de probabilité pour le champ maximal à un emplacement arbitraire à l'intérieur de la chambre est représentée à la Figure A.9. Lorsque  $N$  augmente, la distribution se déplace vers la droite et devient plus étroite (incertitude améliorée). La réduction de l'incertitude pour le niveau de champ maximal est très rapide au départ lorsque le nombre de pas du brasseur est d'abord augmenté, puis diminue lorsque  $N$  devient plus important.

La Figure A.9 montre que pour 12 pas du brasseur, l'incertitude du champ maximal est d'environ 7,2 dB avec l'intervalle de confiance de 95 % et d'environ 4,8 dB pour 100 pas du brasseur. Ceci correspondrait à une augmentation octuple du temps d'essai pour une réduction de 2,4 dB de l'incertitude du niveau de champ maximal. Généralement, la largeur de l'intervalle d'incertitude pour la valeur maximale ou minimale normalisée moyenne diminue plus lentement que  $1/\sqrt{N}$  [19]. De même, augmenter le nombre de pas du brasseur de 12 pas à 100 pas augmente la valeur attendue du champ maximal d'environ 3 dB.

Dans la mesure où la fonction de densité de probabilité pour le champ maximal s'applique à tout emplacement arbitraire, comme elle le fait avec le champ moyen, cette même fonction est également une mesure de l'uniformité spatiale pour  $N$  échantillons du champ maximal sur le volume de travail de la chambre. Grâce aux statistiques de champ, la mesure de l'intensité de champ moyenne en un emplacement permet d'estimer l'intensité de champ maximal en tout autre emplacement à l'intérieur du volume de travail. Cependant, elle ne permet pas de prévoir à quelle position particulière du brasseur cette valeur maximale est atteinte. Cette position du brasseur est différente pour chaque emplacement spatial.

### A.5 Validation de la chambre

#### A.5.1 Généralités

La validation a pour objet de vérifier que les champs générés ont la même amplitude, dans un intervalle d'incertitude défini, pour toutes les polarisations et pour toutes les directions d'arrivée à tous les emplacements à l'intérieur du volume de travail, pour un nombre donné de pas du brasseur. Pour satisfaire à cette exigence, l'utilisation des sondes isotropes, qui permettent l'accès à chacun de leurs axes, est exigée pour effectuer la validation. Une antenne dipolaire électriquement courte étalonnée peut être utilisée comme alternative (voir Article B.1). Il convient d'exécuter la procédure de validation lors de la mise en service de la chambre et après des modifications importantes.

La procédure de validation de la chambre vide est fondée sur une comparaison des champs de crête mesurés par des sondes de champ  $E$ , avec la puissance moyenne reçue d'une antenne de référence. Pour accroître la précision, les données moyennes de l'antenne de référence sont obtenues pour huit emplacements à l'intérieur du volume de travail. Même dans ce cas, l'effet du nombre limité d'emplacements sur l'incertitude peut être important pour un petit nombre  $N$ . Une estimation de l'incertitude du niveau d'uniformité du champ de la chambre (toutefois pour les seules composantes de champ rectangulaires) est calculée en [19].

Le nombre d'échantillons recommandés pour la validation est fondé sur une chambre «théorique» d'une taille d'environ 3 m × 7 m × 15 m, et ayant une valeur  $Q$  type pour une chambre construite en acier soudé. Le nombre d'échantillons nécessaires a été arrondi pour tenir compte des variations de cette chambre «théorique» pour assurer un essai prudent. Il est possible qu'une chambre plus grande ou une chambre avec une valeur de  $Q$  plus faible que la chambre «théorique», puisse satisfaire à cette exigence de validation en utilisant moins de pas que le nombre recommandé.



### A.5.2 Procédure de validation

La procédure de validation rassemble les données de la sonde de champ  $E$  (données maximales uniquement), ainsi que la puissance d'entrée de la chambre et les puissances maximale et moyenne reçues, provenant d'une antenne de référence placée à l'intérieur du volume de travail. Les données de la sonde sont utilisées pour déterminer l'uniformité de champ. Les données de la sonde et la puissance d'entrée de chambre sont utilisées pour déterminer le facteur de validation de la chambre. La puissance moyenne reçue de l'antenne de référence et la puissance d'entrée de la chambre sont utilisées pour calculer le facteur de validation d'antenne. Ce facteur est utilisé comme une valeur de référence lorsqu'on détermine si la chambre a été «soumise à une charge» importante par le matériel en essai. La puissance maximale reçue de l'antenne de référence est utilisée pour vérifier les lectures de la sonde. Les données de la sonde sont collectées à partir de huit emplacements qui forment les coins du «volume de champ uniforme» ou le «volume de travail», comme cela est représenté à la Figure A.10. Chaque fois que la sonde est déplacée vers un nouvel emplacement, l'antenne de référence est déplacée vers un nouvel emplacement à l'intérieur du volume de travail. L'orientation de l'antenne de référence par rapport aux axes de la chambre est également modifiée d'au moins  $20^\circ$  par rapport à chaque axe à chaque emplacement. Ceci assure que toute erreur de polarisation dans le champ local est détectée. Un nombre minimal de huit emplacements est nécessaire pour la sonde et l'antenne de référence.

Le Tableau B.1 donne la liste du nombre de pas du brasseur recommandé pour effectuer la validation. Le nombre de pas peut avoir besoin d'être réduit ou augmenté pour optimiser les performances. Le nombre minimal de pas du brasseur doit être de 12.

NOTE 1 Lorsqu'il a été montré qu'une chambre fonctionne correctement sur une plage de fréquences comprise entre 300 MHz et 400 MHz avec le nombre minimal de pas du brasseur (c'est-à-dire 12 pas), le nombre d'emplacements peut être réduit à trois. Pour la chambre utilisée pour collecter les données présentées dans cette annexe, la réduction du nombre d'emplacements est intervenue à 1 000 MHz.

Chaque chambre aura une fréquence à laquelle elle n'est plus en sur-mode [5, 10, 14], et ainsi, elle ne peut plus être utilisée comme chambre réverbérante. Cette fréquence dépendra principalement de la taille de la chambre, et la coupure sera graduelle plutôt qu'abrupte lorsque la fréquence diminue. Le chargement de la chambre par un matériel en essai ou par un artefact conducteur ou dissipatif peut également réduire la LUF (voir A.5.4).

NOTE 2 Dans certains cas, il est possible de compenser la densité modale réduite qui en résulte, lorsque la fréquence de fonctionnement approche la condition «en sous-mode». En général et en prenant certaines précautions, la compensation peut être obtenue en augmentant le nombre de pas du brasseur, mais les effets peuvent toutefois être limités et spécifiques à une configuration.

### A.5.3 Uniformité de champ

Une chambre réverbérante est destinée à générer un environnement statistiquement uniforme, pour tous les emplacements dans le volume de travail défini. La procédure qui vient d'être décrite est conçue pour mesurer l'amplitude et l'uniformité attendues, pour une chambre donnée, en utilisant un nombre donné de pas du brasseur. Un ensemble type de données de sonde obtenu en utilisant la procédure de validation (données de l'axe  $x$  uniquement, dans un souci de clarté) est représenté à la Figure A.11. La Figure A.12 représente les données de la Figure A.11 normalisées sur la moyenne des huit lectures de sonde maximales selon l'axe  $x$  à chaque fréquence [B.1.2 (10) (a)]. Les données montrent que l'uniformité de champ mesurée est d'environ  $\pm 10$  dB à 100 MHz et qu'elle décroît lorsque la fréquence augmente. De même, noter que les données à des fréquences plus élevées montrent une bonne uniformité même si le nombre de pas du brasseur est réduit.

NOTE 1 Le nombre de pas utilisés pour collecter les données représentées à la Figure A.12 a été fixé avant de déterminer les valeurs données dans le Tableau B.1. Ceci explique la révision de 20 pas en 18 pas et de 16 pas en 18 pas.

Actuellement, il existe deux écoles de pensée concernant la meilleure méthode de détermination de l'uniformité acceptable. Pour la première méthode (voir [29]), l'uniformité acceptable est décidée en éliminant 25 % des données qui ont le plus de variation, puis en



exigeant que les données restantes soient dans la limite indiquée. Dans la seconde méthode [30, 31], l'uniformité acceptable est déterminée en calculant l'écart type de toutes les données et en exigeant qu'il se situe dans la limite donnée. L'inconvénient principal de la première méthode est qu'aucun «poids» n'est accordé aux données éliminées. Ceci pourrait avoir comme résultat que les incertitudes restent essentiellement inconnues. Pour les besoins de la présente norme, il a été convenu d'utiliser la méthode de l'écart type, étant donné qu'il est alors tenu compte de toutes les données et qu'un poids approprié leur est attribué.

L'écart type des données représentées à la Figure A.12 est montré à la Figure A.13. Les données montrent que, dans ce cas, l'écart type a dépassé 3 dB en dessous d'environ 200 MHz. Par exemple et à titre de référence, la tolérance pour la norme des avions commerciaux est également représentée [30].

NOTE 2 La chambre est considérée comme satisfaisant aux exigences d'uniformité de champ sous réserve que l'écart type pour à la fois les trois composantes individuelles de champ ( $E_x$ ,  $E_y$ , et  $E_z$ ), et l'ensemble total des données ( $E_{Total}$ ) se situent dans les limites de tolérance spécifiées. L'ensemble total des données se compose de 24 mesures réalisées en combinant les trois composantes individuelles de champ ( $E_x$ ,  $E_y$ , et  $E_z$ ) provenant des 8 emplacements de la sonde. La chambre utilisée pour collecter ces données ne pouvait pas être utilisée en-dessous de 130 MHz, selon la limite spécifiée en [30], à moins que l'uniformité de champ ne soit améliorée [25]. Un comité composé de représentants à la fois de l'industrie et du gouvernement a développé la limite proposée.

NOTE 3 Une tolérance exceptionnelle est prévue pour une non-uniformité de champ augmentée, respectivement, jusqu'à 4 dB entre 100 MHz et 400 MHz, par comparaison à 3 dB à toute fréquence supérieure à 400 MHz (voir Figure A.13). Cette tolérance a été influencée à la fois par le souhait d'une harmonisation de la présente norme CEI avec d'autres normes [29], ainsi que pour des raisons économiques. Les dimensions de la chambre imposent le choix de la LUF. Souvent, la hauteur du plafond de la plupart des installations entraîne des performances réduites. Les valeurs d'uniformité de champ détendue inférieures à 400 MHz permettent l'essai de matériels en essai de très grandes dimensions (par exemple, avions) dans une chambre réverbérante sans que l'utilisation d'une chambre excessivement grande ne se révèle nécessaire.

NOTE 4 L'ensemble total des données n'est PAS la racine de la somme des carrés (RSS) la plus communément utilisée de  $E_x$ ,  $E_y$ , et  $E_z$  [30].

#### A.5.4 Champ $E$ de la chambre

La valeur d'amplitude «attendue» du champ  $E$  de la chambre au cours de la validation est simplement la moyenne arithmétique des 24 valeurs maximales lues de la sonde (la moyenne des valeurs maximales). La «valeur attendue» est la valeur à laquelle la chambre est étalonnée (voir Figure A.9).

Il est également possible d'estimer le champ  $E$  de la chambre ( $E_{Eut}$ ) fondé sur les mesures de l'antenne de référence. Equation (A.6):

$$E_{EUT} = \left\langle \frac{8\pi}{\lambda} \sqrt{5 \frac{P_{MaxRec}}{\eta_{rx}}} \right\rangle_n \quad (A.6)$$

a été obtenue en utilisant des méthodes similaires à celles utilisées pour obtenir les expressions pour le champ moyen [11], et donne une estimation du champ  $E$  de la chambre (en V/m) fondée sur les valeurs maximales lues provenant de l'antenne de référence, en faisant la moyenne sur le nombre d'emplacements ou des orientations de l'antenne ( $n$ ), où

$P_{MaxRec}$  est la puissance maximale reçue (en W) sur le nombre donné de pas du brasseur à un emplacement d'antenne ou son orientation,

$\eta_{rx}$  est le facteur d'efficacité de l'antenne pour l'antenne de réception qui peut être supposé (à défaut d'être connu) égal à 0,75 pour une antenne log périodique et à 0,9 pour une antenne cornet. Ce paramètre peut être déterminé à partir des informations contenues à l'Annexe I;

$n$  est le nombre d'emplacements et orientations d'antennes.



Pour toutes les mesures, on part de l'hypothèse selon laquelle la puissance incidente d'entrée est la même pour toutes les données collectées. Si tel est le cas, les données peuvent alors être normalisées après avoir pris la moyenne des valeurs lues de la sonde. Si tel n'est pas le cas, il est alors nécessaire que les valeurs soient rendues égales en normalisant par rapport à la valeur de la puissance d'entrée, qui correspond à cette valeur lue de la sonde. La normalisation du champ  $E$  sur la puissance d'entrée de la chambre est réalisée en divisant les valeurs lues de la sonde par la racine carrée de la puissance d'entrée. Ceci peut également être réalisé pour le champ  $E$  estimé, basé sur l'antenne de référence.

Il est recommandé d'effectuer une contre-vérification par comparaison du champ  $E$  moyen mesuré par les sondes avec le champ  $E$  attendu estimé, sur la base des huit mesures d'antenne. Il convient que toute divergence supérieure à  $\pm 3$  dB entre les mesures avec la sonde et les mesures avec l'antenne soit résolue (voir également l'Article 8). Noter que des désaccords importants sont attendus à des fréquences peu élevées du fait de la charge due par les antennes émettrices et réceptrices. Pour cette raison, l'accord entre les deux méthodes n'est pas attendu à des fréquences où la différence entre la puissance d'entrée de la chambre et la puissance maximale reçue mesurée de l'antenne de référence est inférieure ou égale à 10 dB.

#### A.5.5 Effets de charge

Lorsque le matériel en essai ou tout autre objet est placé dans une chambre réverbérante, il est possible que le matériel en essai «charge» la chambre. L'énergie absorbée par le matériel en essai ou d'autres objets n'est alors plus disponible pour générer l'environnement désiré. Pour cette raison, la puissance d'entrée de la chambre doit être augmentée pour compenser cette charge. Toute «charge» provoquée par la réduction du volume de travail (même lorsque le matériel en essai est non absorbant), est limitée par l'exigence selon laquelle le matériel en essai et tous les équipements de support ne doivent pas occuper plus de 8 % du volume total de la chambre (voir Article D.1).

NOTE 1 La source des champs est en fait la réflexion de l'énergie radioélectrique par les parois. Bien qu'une antenne soit utilisée pour injecter l'énergie radioélectrique dans la chambre, cette énergie n'est pas dirigée vers le matériel en essai. Si le matériel en essai absorbe l'énergie, alors cette énergie n'est plus disponible pour participer à la génération de l'environnement d'essai. Les données suivantes démontrent le concept.

Avant de réaliser tout essai, une vérification des effets de charge doit être effectuée. Ceci est effectué en mesurant la puissance moyenne reçue par l'antenne de référence, pour le même nombre de pas du brasseur utilisés pour l'étalonnage avec le matériel en essai en place. Les données provenant de cette mesure unique sont ensuite comparées avec les huit mesures provenant de la validation. Si la puissance reçue moyenne mesurée avec le matériel en essai en place ne s'inscrit pas dans la plage acceptable du champ moyen mesuré au cours de la validation (c'est-à-dire, si elle est considérablement supérieure ou inférieure aux données de validation), alors la chambre est considérée comme ayant été chargée par le matériel en essai. Un facteur de correction sera alors nécessaire pour le calcul de la puissance d'entrée nécessaire pour générer le champ d'essai désiré. Ce facteur est désigné comme le facteur de charge de chambre. Ce facteur est obtenu en prenant le rapport entre la mesure prise avec le matériel en essai en place et la valeur moyenne ou «attendue» provenant des huit mesures prises au cours de la validation, c'est-à-dire pour la même configuration sauf pour le matériel en essai retiré [30].

Pour déterminer la limite à laquelle une chambre peut être chargée, une évaluation doit être effectuée pour évaluer l'uniformité de champ dans des conditions de charge sévères (B.1.6). Un exemple d'une telle évaluation est donné à la Figure A.14. Le volume de travail de cette chambre réverbérante a été chargé avec 27 absorbants de forme pyramidale de 122 cm. La Figure A.15 montre la quantité de charge induite dans la chambre par les absorbants. La charge de la chambre ou la quantité de charge a varié d'un maximum d'environ 23 dB à un minimum de 10 dB avec une charge moyenne d'environ 14 dB sur la gamme de fréquences de 100 MHz à 18 GHz. La Figure A.16 représente l'écart type des champs dans la chambre chargée. L'écart type de la chambre chargée, tout en variant légèrement de la validation de la chambre vide représenté aux Figures A.12 et A.13, n'a pas montré de dégradation significative.



NOTE 2 L'écart type a augmenté (et non pas baissé) d'environ 0,5 dB selon toute probabilité en raison de la proximité de la sonde avec l'absorbant, qui contribue à ce que l'amplitude du champ adopte une distribution différente avec une plus grande incertitude [14].

### A.5.6 Génération d'un champ d'essai – Immunité

L'environnement d'essai désiré est généré en injectant la quantité convenable de puissance dans la chambre. La puissance nécessaire pour générer le champ désiré peut être calculée en utilisant l'Equation (A.7).

$$P_{\text{Entrée}} = \left[ \frac{E_{\text{Test}}}{\bar{E} \sqrt{CLF}} \right]^2 \quad (\text{A.7})$$

où

$E_{\text{Test}}$  est le champ nécessaire (en V/m),

$CLF$  est le facteur de charge de chambre (Article B.2 (7)) (adimensionnel), et

$\bar{E}$  est la moyenne des valeurs du champ  $E$  maximal mesurées par les sondes respectives, divisée par la racine carrée de la puissance d'entrée utilisée au cours de la validation (V/m)/W<sup>0,5</sup> (B.1.2 (9)).

Noter que les mesures de la sonde utilisées pour déterminer le champ  $E$  de la chambre sont les composantes rectangulaires de la sonde, et non pas la racine de la somme des carrés.

### A.5.7 Détermination de la puissance rayonnée – Emissions

La quantité de puissance radioélectrique rayonnée par un dispositif placé dans la chambre, peut être déterminée en mesurant la quantité de puissance reçue par l'antenne de référence, et en corrigeant la perte d'insertion de la chambre [4]. La puissance rayonnée par un dispositif peut être calculée en utilisant, soit la puissance moyenne ou de crête reçue d'un nombre donné de pas et/ou de rotations du brasseur. L'Equation (A.8) est utilisée pour les mesures fondées sur la puissance moyenne reçue et l'Equation (A.9) est utilisée pour les mesures fondées sur la puissance de crête reçue. L'avantage à utiliser des mesures fondées sur la puissance moyenne est que l'incertitude est plus faible. L'inconvénient est la nécessité pour le système de mesure d'avoir une sensibilité inférieure de 20 dB à la moyenne réelle pour obtenir une mesure précise de la moyenne, et des signaux intermittents peuvent être artificiellement abaissés en raison d'un échantillonnage insuffisant.

$$P_{\text{Rayonnée}} = \frac{P_{\text{Moy Rec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CVF} \quad (\text{A.8})$$

$$P_{\text{Rayonnée}} = \frac{P_{\text{Max Rec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CLF \times IL} \quad (\text{A.9})$$

où

$P_{\text{Rayonnée}}$  est la puissance rayonnée (en W) provenant du dispositif dans la largeur de bande de mesure,

$CVF$  est le facteur de validation de chambre (adimensionnel) (Article B.2 (6)),

$CLF$  est le facteur de charge de chambre (adimensionnel) (Article B.2 (7)),

$IL$  est la perte d'insertion de la chambre (adimensionnel) (B.1.3),

$P_{\text{Moy Rec}}$  est la puissance reçue (en W) telle qu'elle est mesurée par l'antenne de référence moyennée sur le nombre de pas du brasseur, (B.1.2 (5))

$P_{\text{Max Rec}}$  est la puissance maximale reçue (en W) sur le nombre de pas du brasseur (B.1.2 (5)), et



$\eta_{Tx}$  est le facteur d'efficacité de l'antenne (adimensionnel) pour l'antenne Tx utilisé pour l'étalonnage de la chambre, et on peut estimer qu'il est de 0,75 pour une antenne log périodique et de 0,9 pour une antenne cornet.

NOTE Il convient de se référer à la CISPR 16-1-1 pour la sélection des détecteurs des récepteurs de mesure.

#### A.5.8 Facteur $Q$ de la chambre pour les essais en ondes entretenues et en impulsion

La validation est fondée sur l'utilisation d'une onde entretenue. Lorsqu'on utilise des formes d'onde modulées, il doit être tenu compte de la distorsion causée par le facteur de qualité de la chambre ou  $Q$  (Article B.3). Le facteur  $Q$  de la chambre peut être calculé en utilisant l'Equation (A.10):

$$Q = \left( \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \right) \left( \frac{P_{Moy Rec}}{P_{Entrée}} \right)_n \quad (A.10)$$

où

$\eta_{Tx}$  et  $\eta_{Rx}$  sont les facteurs d'efficacité de l'antenne (adimensionnel) pour les antennes émettrice (Tx) et réceptrice (Rx) respectivement, et on peut estimer, de manière prudente, qu'il est de 0,75 pour une antenne log périodique et de 0,9 pour une antenne cornet,

$V$  est le volume de la chambre (en m<sup>3</sup>),

$\lambda$  est la longueur d'onde dans l'espace libre (m) à la fréquence spécifique,

$P_{Moy Rec}$  est la puissance moyenne reçue (en W) pour l'antenne de référence,

$P_{Entrée}$  est la puissance d'entrée de la chambre (en W) [30], et

$n$  est le nombre d'emplacements et d'orientations d'antenne utilisés pour collecter les données de validation à la fréquence évaluée.

Pour les essais en impulsion, la constante de temps de la chambre  $\tau$  est donnée par l'Equation (A.11)

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f} \quad (A.11)$$

où

$Q$  est la valeur calculée en utilisant l'Equation (A.10) ci-dessus, et

$f$  est la fréquence d'essai (en Hz).

Il convient que la constante de temps de la chambre ne soit pas supérieure à 0,4 de toute largeur d'impulsion de forme d'onde d'essai. Si tel est cependant le cas, un absorbant doit alors être ajouté dans la chambre ou il convient d'augmenter la largeur d'impulsion. Si on utilise un absorbant, ajouter ce dernier jusqu'à satisfaire à l'exigence de constante de temps avec le moins d'absorbant possible. Un nouveau facteur de charge de chambre doit être obtenu en cas d'utilisation d'un absorbant. Si la charge due à l'absorbant est supérieure à celle obtenue lors de la vérification de charge de chambre (B.1.6), la validation de la chambre doit alors être répétée.

#### A.6 Documents de référence

- [1] BECKER, GE. and AUTLER, SH., Water vapor absorption of electromagnetic radiation in the centimeter wave-length range, Phys. Rev., Sep. 1946, vol. 70 no. 5/6, pp. 300–307.

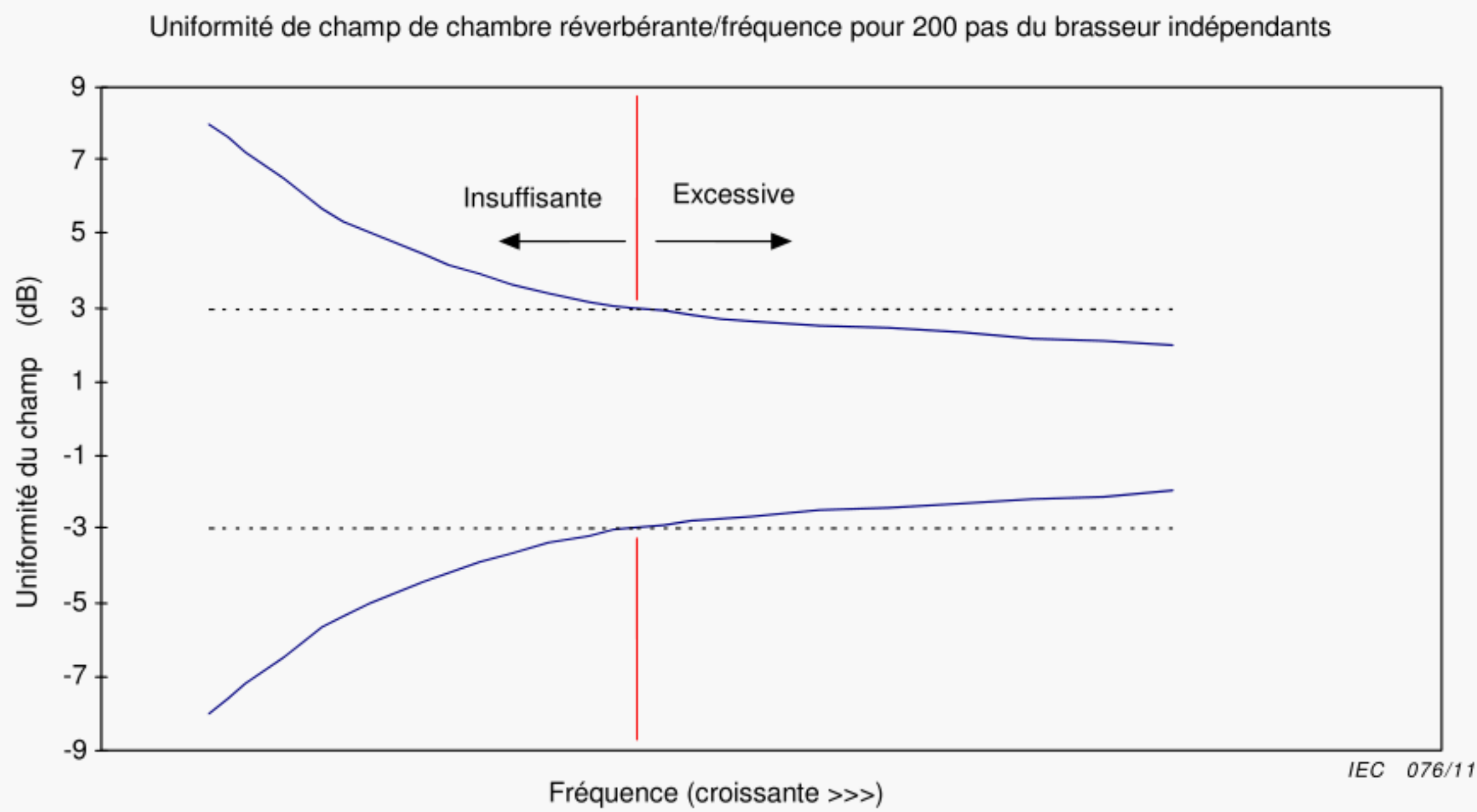


- [2] LAMB, WE. (Jr.), Theory of a microwave spectroscope, Phys. Rev., Sep. 1946, vol. 70 nos. 5/6, pp. 308–317.
- [3] MEYER, E., HELBERG, H-W, and VOGEL, S. Hallraumesstechnik und Bau eines grossen Hallraums für elektromagnetische Wellen, Z. Angew. Physik, Aug. 1960, vol. 12 no. 8, pp. 337–346.
- [4] CORONA, P., LATMIRAL, G. , PAOLINI, E., and PICCIOLI, L. Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. EMC., vol. 18 no. 2, May 1976, pp. 54–59, Comments and corrections, IEEE Trans. EMC, vol. 18 no. 4, Nov. 1976, p. 205.
- [5] CRAWFORD, ML. and KOEPKE GH. Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements. National Bureau of Standards (US) Technical Note 1092, April 1986.
- [6] CORONA, P, LADBURY, J and LATMIRAL, G. Reverberation-chamber research then and now: a review of early work and comparison with current understanding, IEEE Trans. EMC, Feb 2002, vol. 44 no. 1, pp. 87–94.
- [7] BÄCKSTRÖM, M., LUNDÉN O. and KILDAL, P-S. Reverberation Chambers for EMC Susceptibility and Emission Analyses. Review of Radio Science 1999-2002, Chapter 18, Wiley-Interscience, Inc., New York, 2002.
- [8] ARNAUT, LR. On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, Nov. 2005, vol. 47 no. 4, pp. 781–804.
- [9] KOSTAS, J. G., and BOVERIE, B. Statistical model for a mode-stirred chamber, IEEE Trans. EMC, Nov. 1991, vol. 33, pp. 366–370.
- [10] HILL, DA. Electromagnetic theory of reverberation chambers. National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1506, Dec. 1998.
- [11] LADBURY, JM, KOEPKE GH. and Camell, DG. Evaluation of the NASA Langley research center mode-stirred chamber facility. National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1508, Jan. 1999.
- [12] ARNAUT, LR. Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies. IEEE Trans. EMC, Nov. 2001, vol. 43 no. 4, pp. 637–653.
- [13] MARVIN, AC., ANGUS, JAS., DAWSON, JF. and CLEGG, J. Enhancements to stirred mode chambers by the use of pseudo-random phase reflection gratings," in Proc. EMC'94 Int. Symp. EMC Rome, Italy, 1994, pp. 218–221.
- [14] ARNAUT, LR. Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers. IEEE Trans. EMC, Aug. 2002, vol. 44 no. 3, pp. 442–457.
- [15] ARNAUT, LR. Limit distribution for imperfect electromagnetic reverberation, IEEE Trans. EMC, May 2003, vol. 45 no. 2, pp. 357–379.
- [16] DUNN, JM. Local, high-frequency analysis of the fields in a mode-stirred chamber", IEEE Trans. EMC, Feb. 1990, vol. 32, no. 1, pp. 53–58.
- [17] HILL, DA. Boundary fields in reverberation chambers", IEEE Trans EMC, May 2005, vol. 47, no. 2, pp. 281–290.

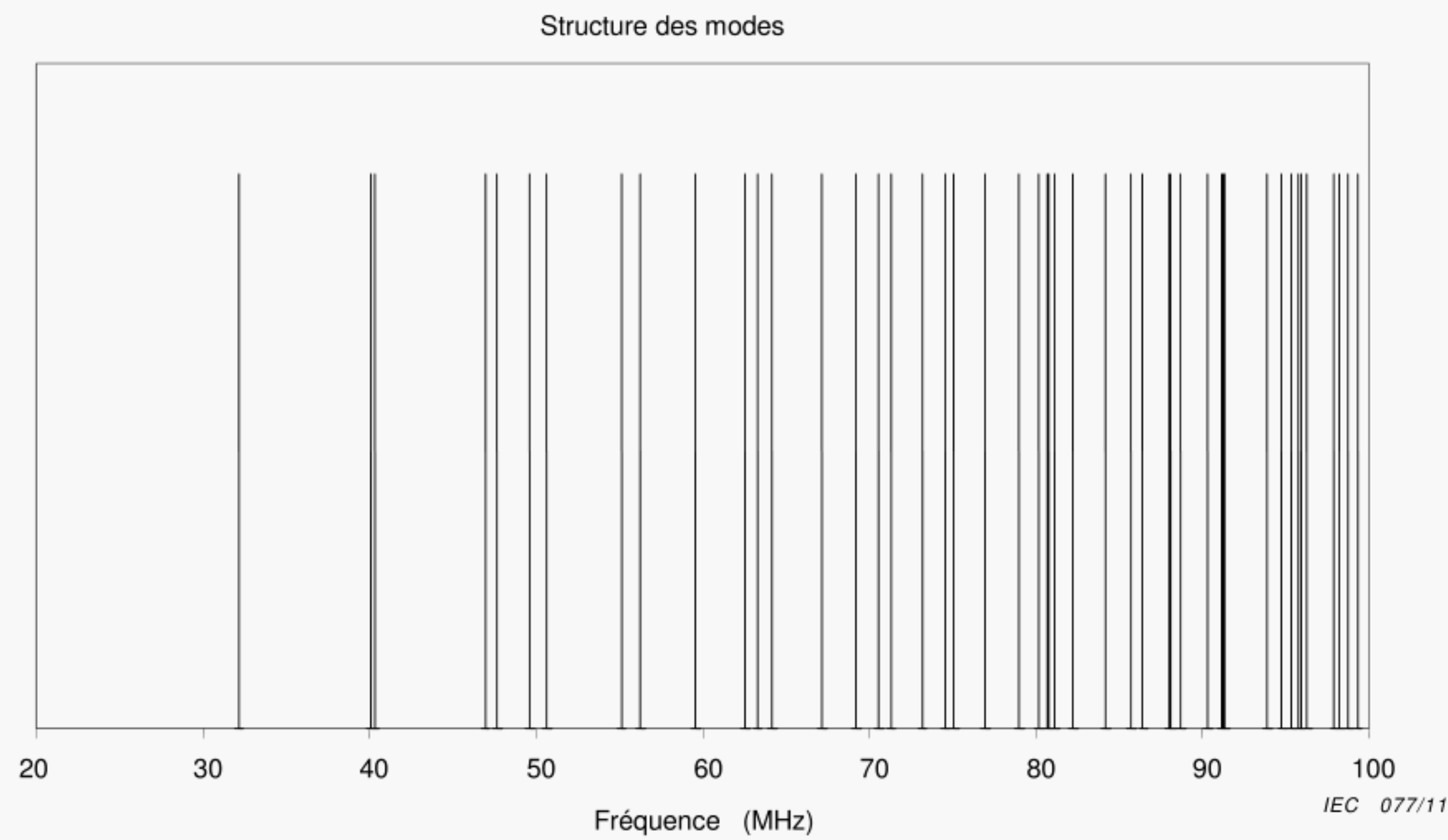


- [18] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary, IEEE Trans. EMC, May 2006, vol. 48 no. 2, pp. 359–371.
- [19] ARNAUT, LR. Measurement uncertainty in reverberation chambers - I. Sample statistics, Report TQE 2, Ed. 2.0, National Physical Laboratory, Teddington, U.K., Dec. 2008. [[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/TQE2.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf)]
- [20] LUNDÉN, O. and BÄCKSTRÖM, M. Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers, evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests. Proceedings IEEE International Symposium on EMC, Washington, DC, Aug. 2000, pp. 11–16.
- [21] KRAUTHÄUSER, H. G., WINZERLING, T., NITSCH, J., EULIG, N. and ENDERS, A., Statistical interpretation of autocorrelation coefficients for fields in mode-stirred chambers. Proceedings IEEE International Symposium on EMC, Chicago, IL, Aug. 2005, pp. 550–555.
- [22] LEHMAN, TH. A statistical theory of electromagnetic fields in complex cavities. Note 494, USAF Phillips Laboratory Interaction Note Series, May 1993.
- [23] ARNAUT, LR. And WEST, PD., Evaluation of the NPL stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques, National Physical Laboratory Report CEM 11, Aug. 1998.
- [24] FREYER, GJ., HATFIELD, MO., JOHNSON, DM. and SLOCUM, MB. Comparison of measured and theoretical statistical properties of complex cavities. Proceedings IEEE International Symposium on EMC, Santa Clara, CA, August 1996, pp. 250-253.
- [25] LADBURY, JM. and GOLDSMITH, K. Reverberation chamber verification procedures, or how to check if your chamber ain't broke and suggestions on how to fix it if it is. Proceedings IEEE International Symposium on EMC, Washington DC, Aug 2000, pp.17-22.
- [26] LADBURY, JM. Reverberation chamber relationships: corrections and improvements, or three wrongs can (almost) make a right. Proceedings IEEE International Symposium on EMC, Seattle, WA, August 1999, pp.1-6.
- [27] ARNAUT, LR. Sampling distributions of random electromagnetic fields in mesoscopic or dynamical systems, Phys. Rev. E, vol. 80, no. 3, 036601, 2009.
- [28] LIU, B-H., CHANG, DC and MA, MT. Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber, National Bureau of Standards, Technical Note 1066, 1983.
- [29] 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
- [30] RTCA/DO-160E, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. (Change Notice to Section 20), Dec. 2004.
- [31] MIL-STD-461E, Requirements for the control of electromagnetic interference emissions and susceptibility, Aug. 1999.
- [32] MIL-STD-1377, Effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance, Aug. 1977.





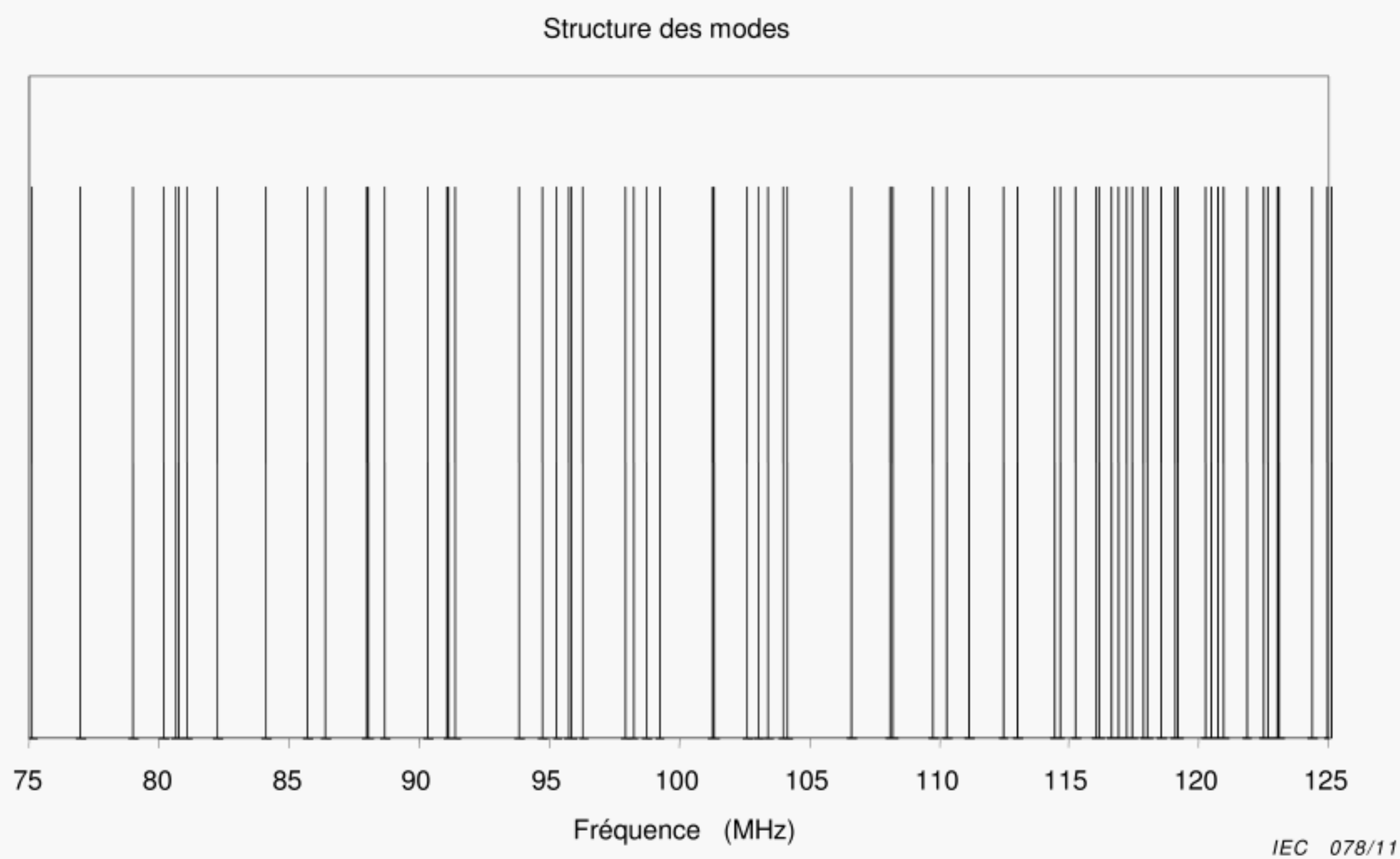
**Figure A.1 – Uniformité de champ type pour 200 pas indépendants du brasseur**



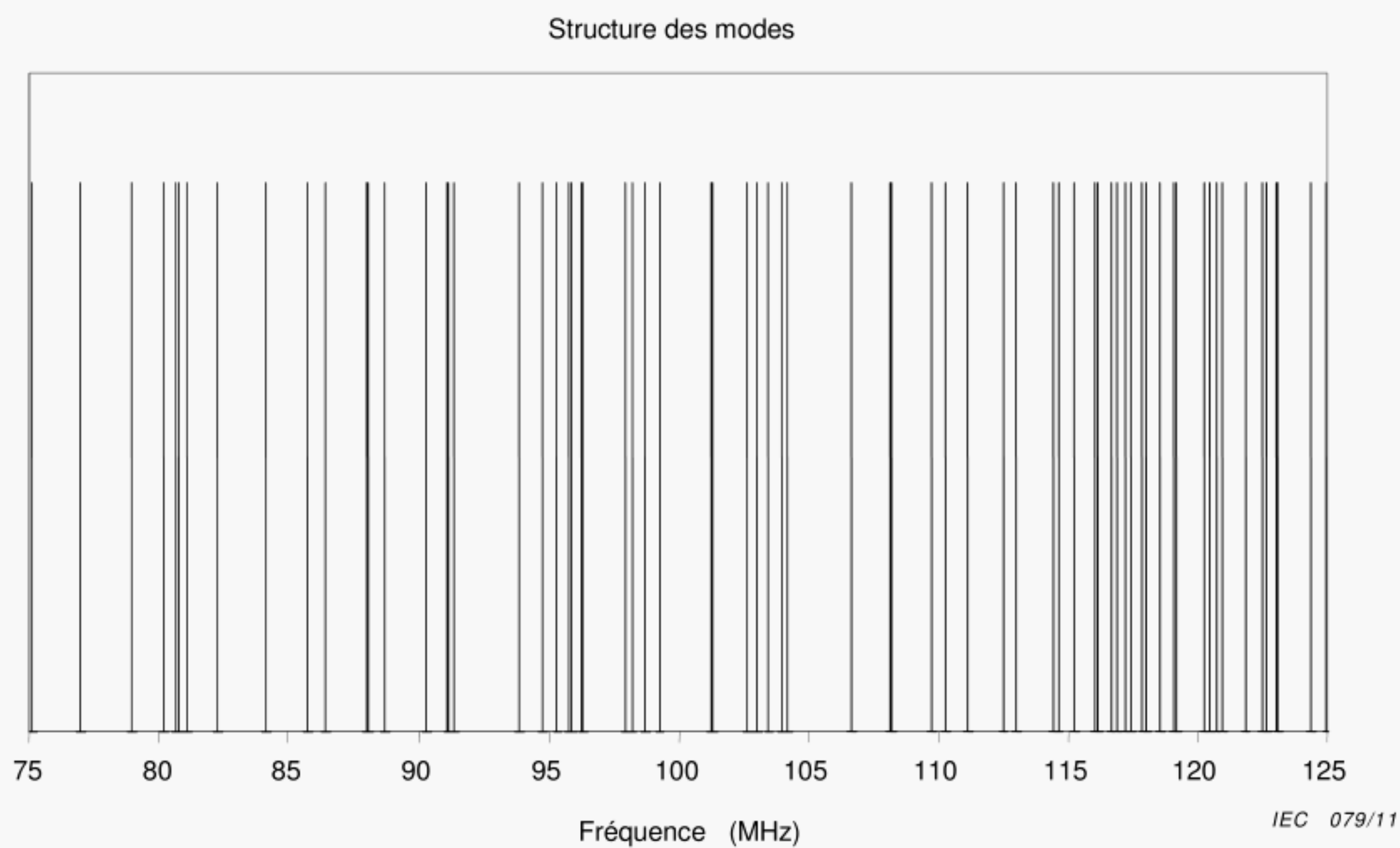
NOTE L'axe vertical n'a d'autre signification que de montrer la présence d'un mode.

**Figure A.2 – Structure modale théorique pour une chambre de 10,8 m × 5,2 m × 3,9 m**



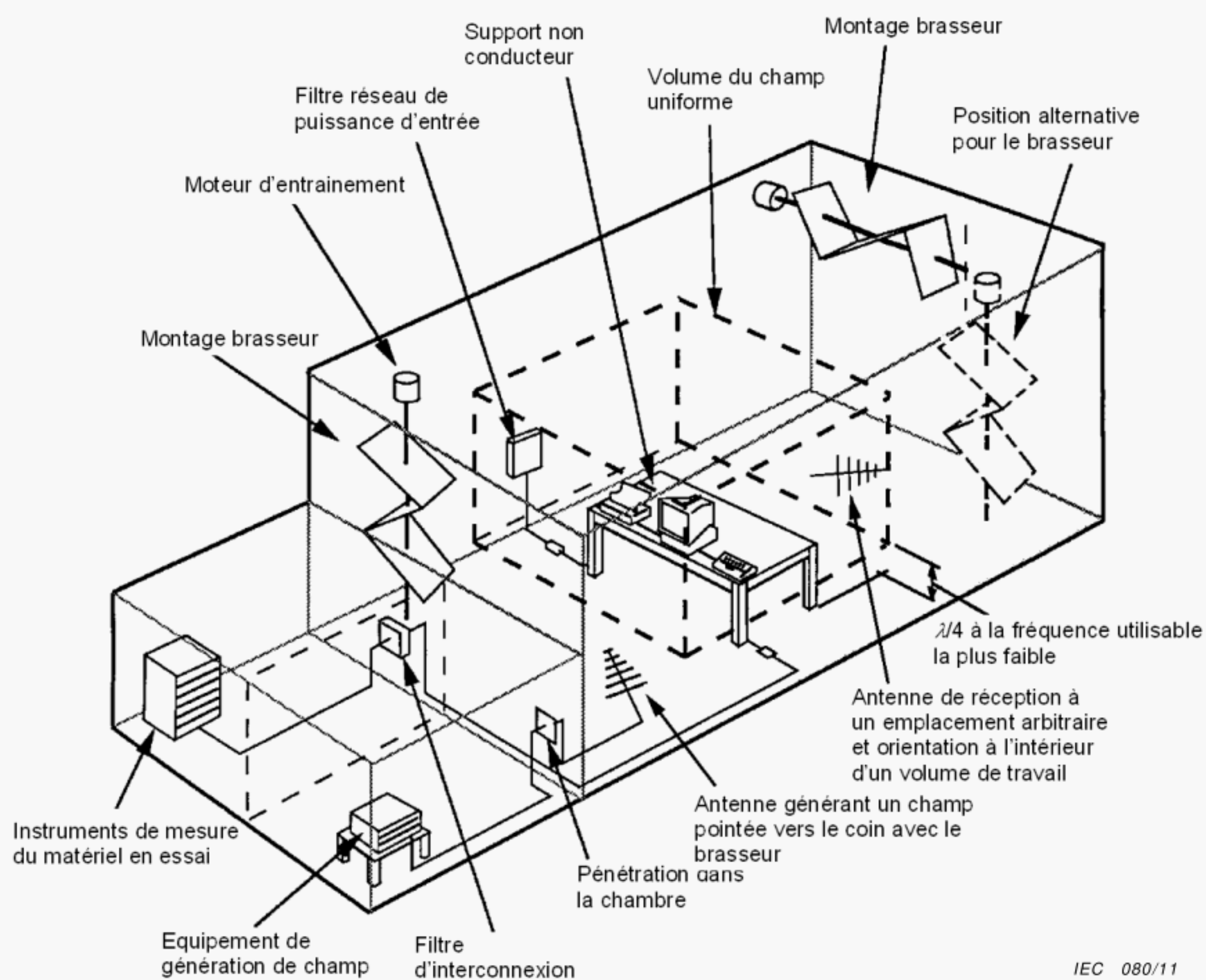


**Figure A.3 – Structure modale théorique avec faible largeur de bande du facteur de qualité ( $Q$  élevé) superposée sur le 60<sup>ème</sup> mode**



**Figure A.4 – Structure modale théorique avec largeur de bande du facteur de qualité plus élevée ( $Q$  plus faible) superposée sur le 60<sup>ème</sup> mode**

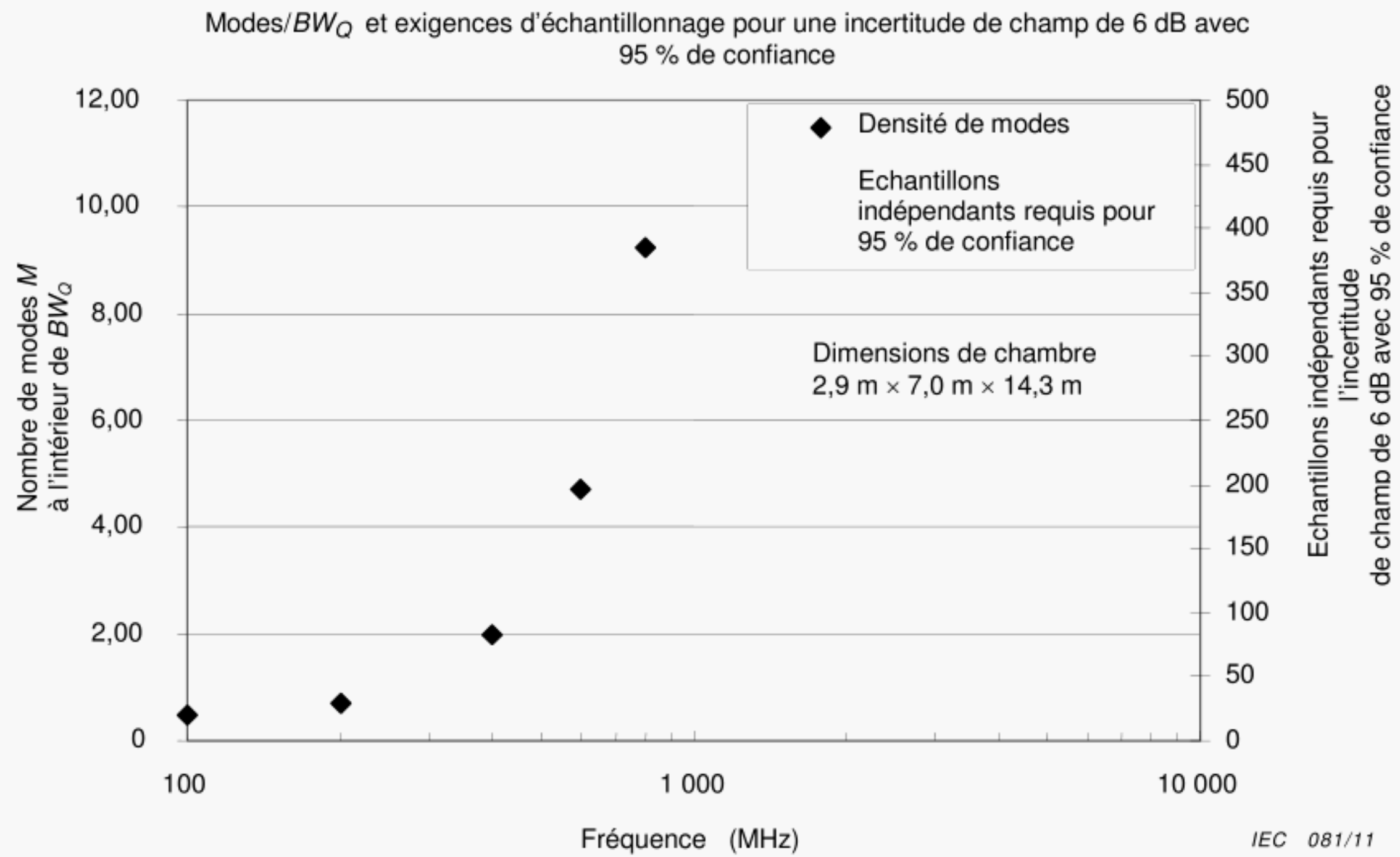




IEC 080/11

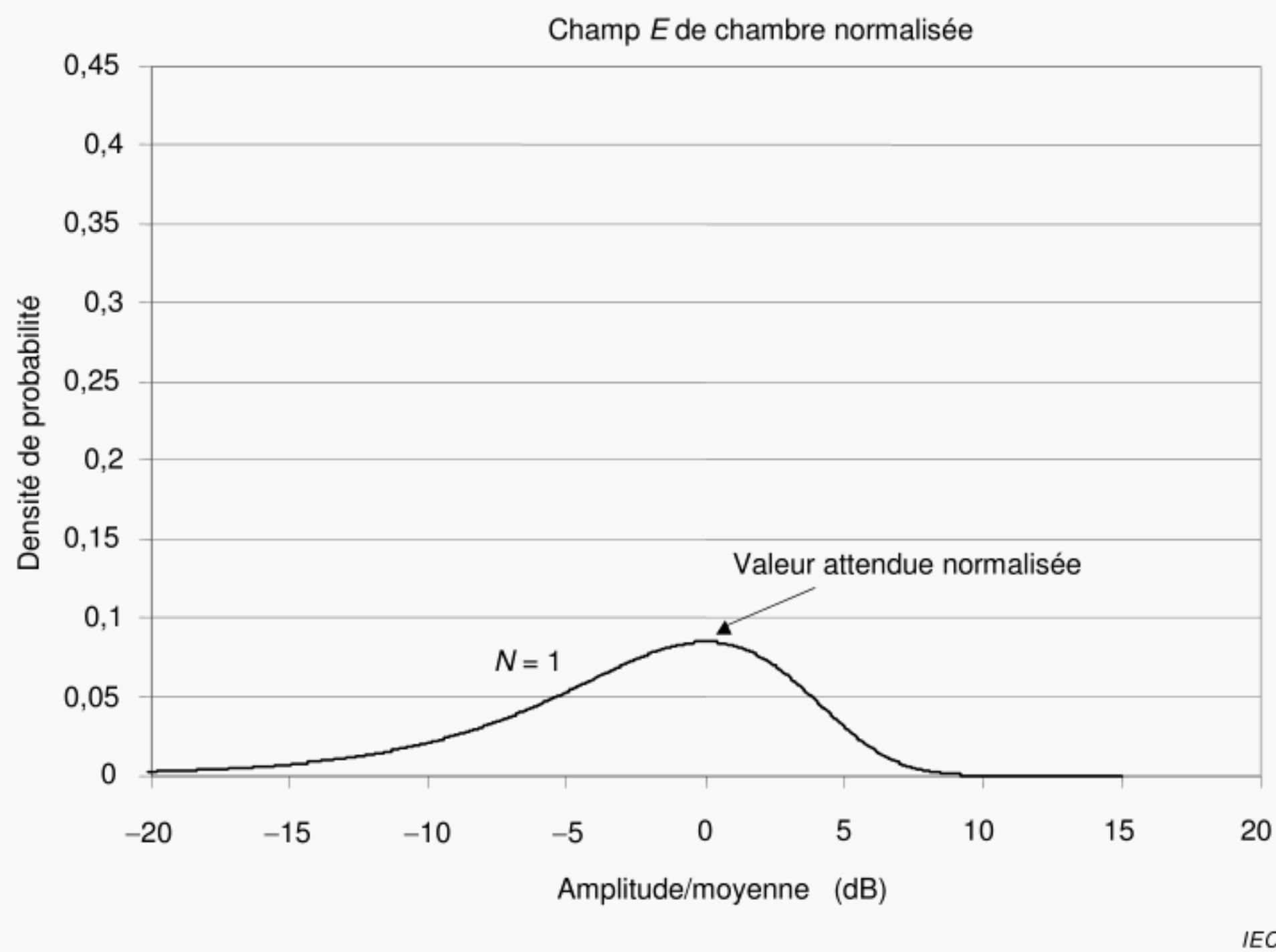
**Figure A.5 – Installation de chambre réverbérante type**





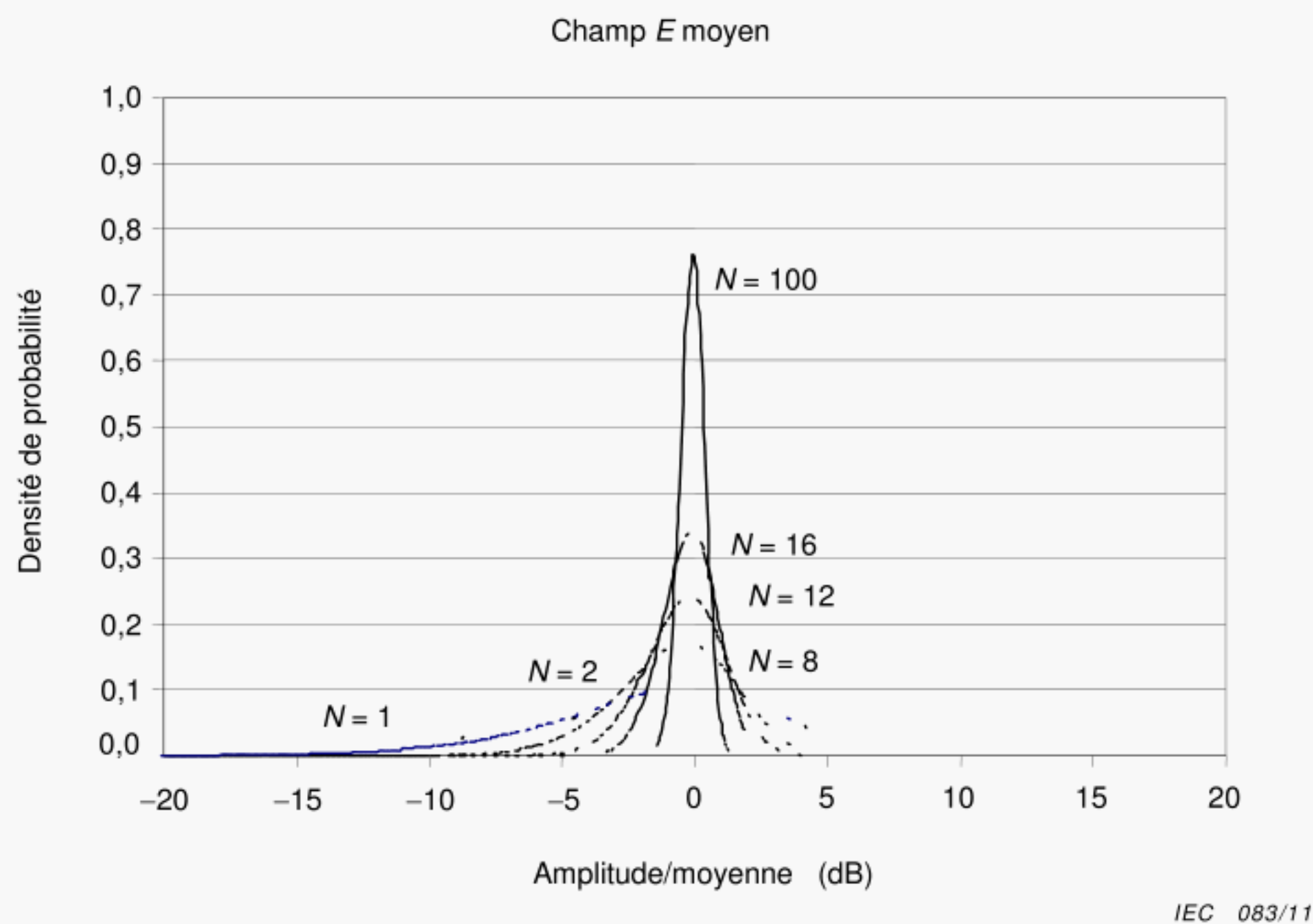
NOTE Voir l'Equation (A.3) sur le calcul de  $M$ .

**Figure A.6 – Exigences d'échantillonnage théorique pour une confiance de 95 %**

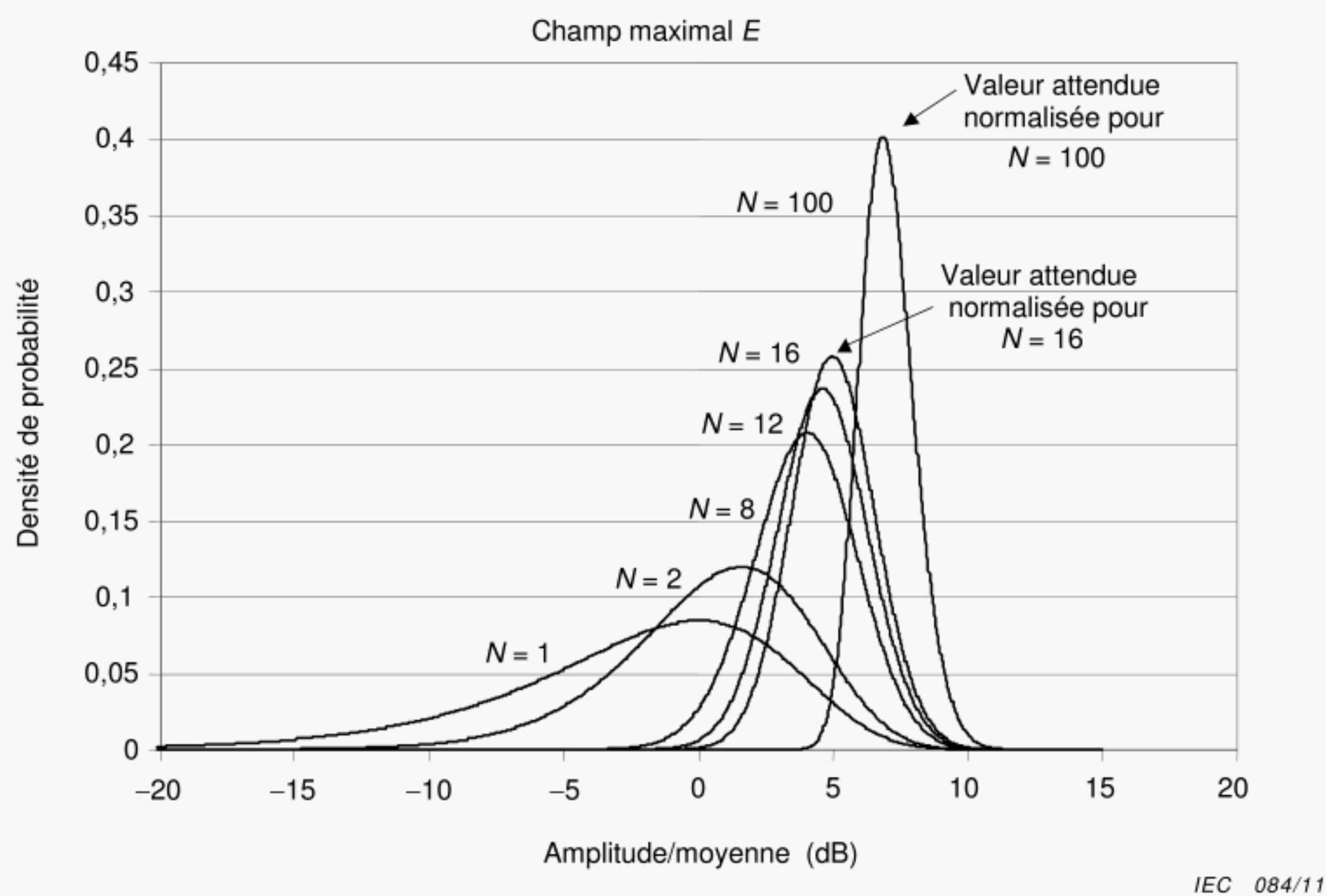


**Figure A.7 – Fonction de densité de probabilité normalisée d'une composante de champ électrique à un emplacement fixe pour une mesure avec un seul échantillon**



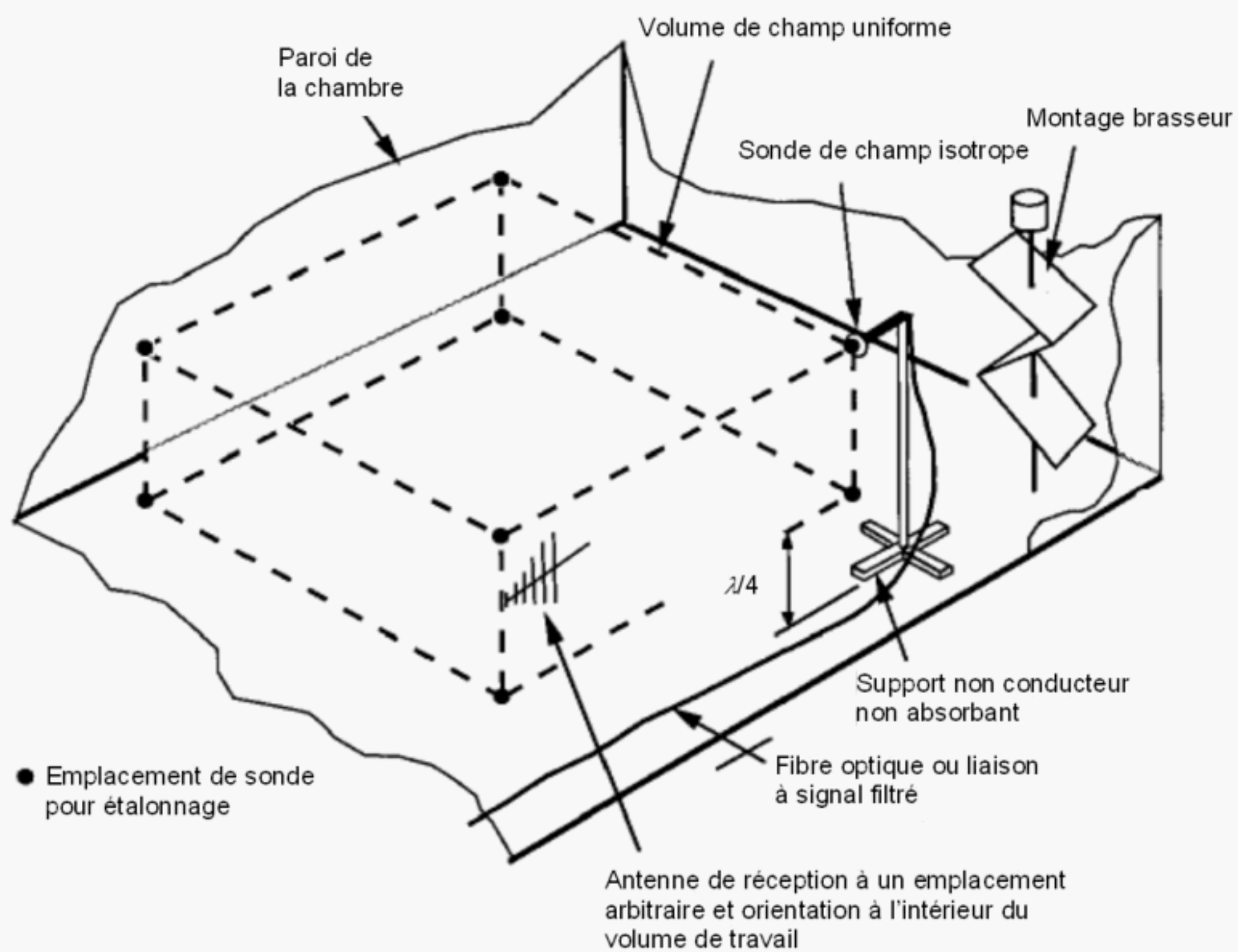


**Figure A.8 – Fonction de densité de probabilité normalisée de la moyenne d'une composante de champ électrique à un emplacement fixe pour une mesure avec  $N$  échantillons indépendants**



**Figure A.9 – Fonction de densité de probabilité normalisée de la valeur maximale d'une composante de champ électrique à un emplacement fixe pour une mesure avec  $N$  échantillons indépendants**





IEC 085/11

**Figure A.10 – Volume de travail de la chambre**



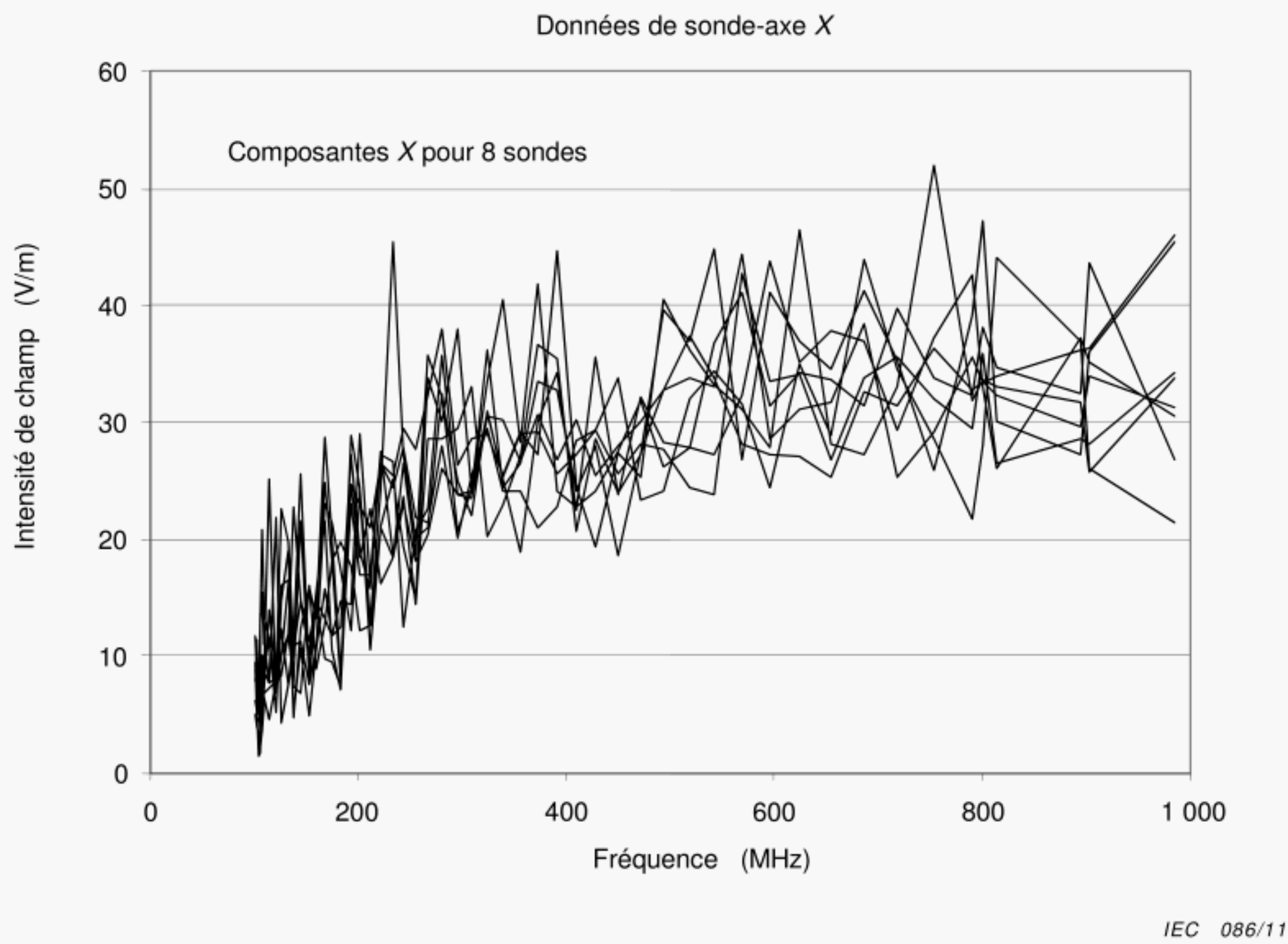


Figure A.11 – Données types de sonde

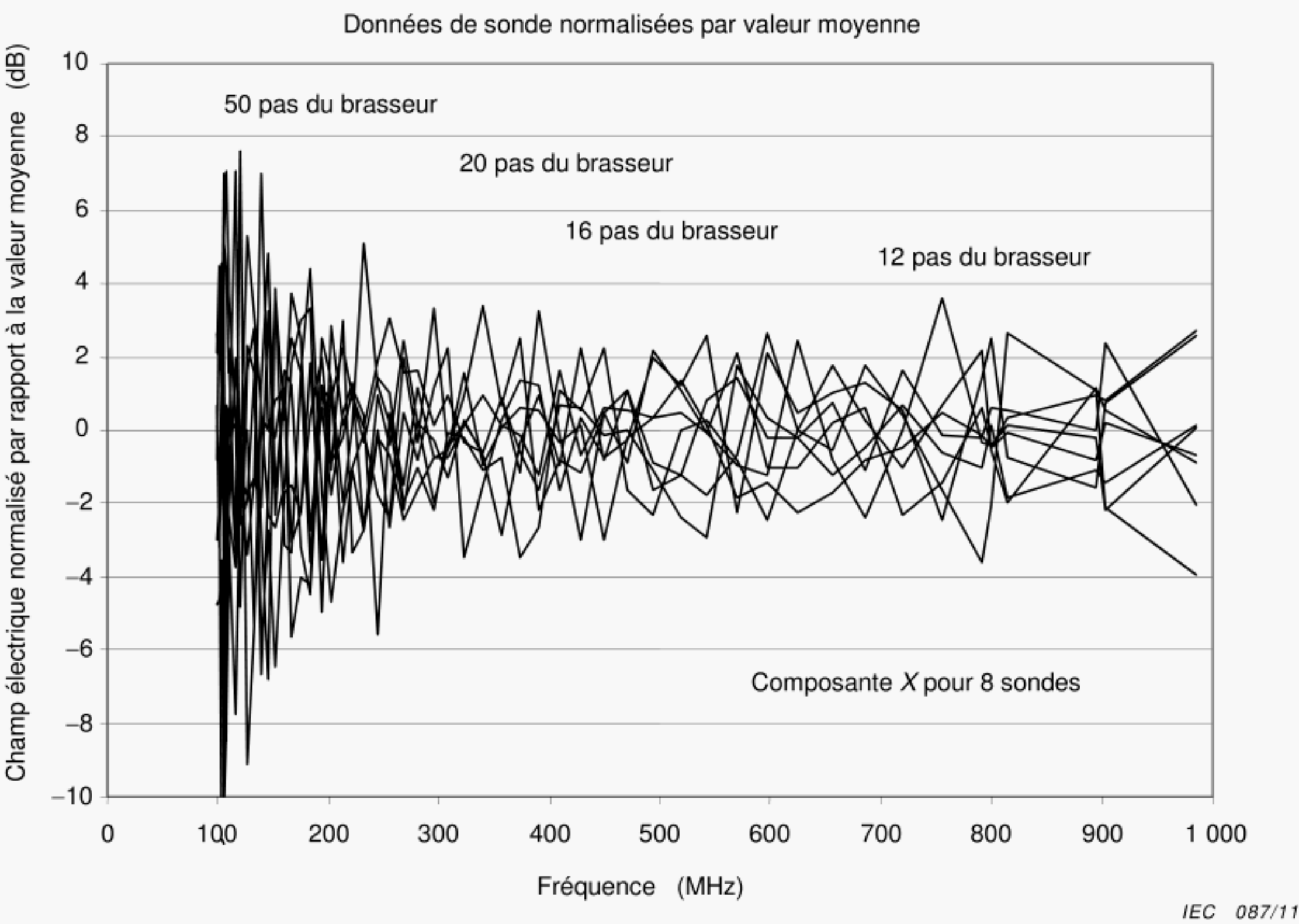


Figure A.12 – Données normalisées moyennes pour la composante x de 8 sondes



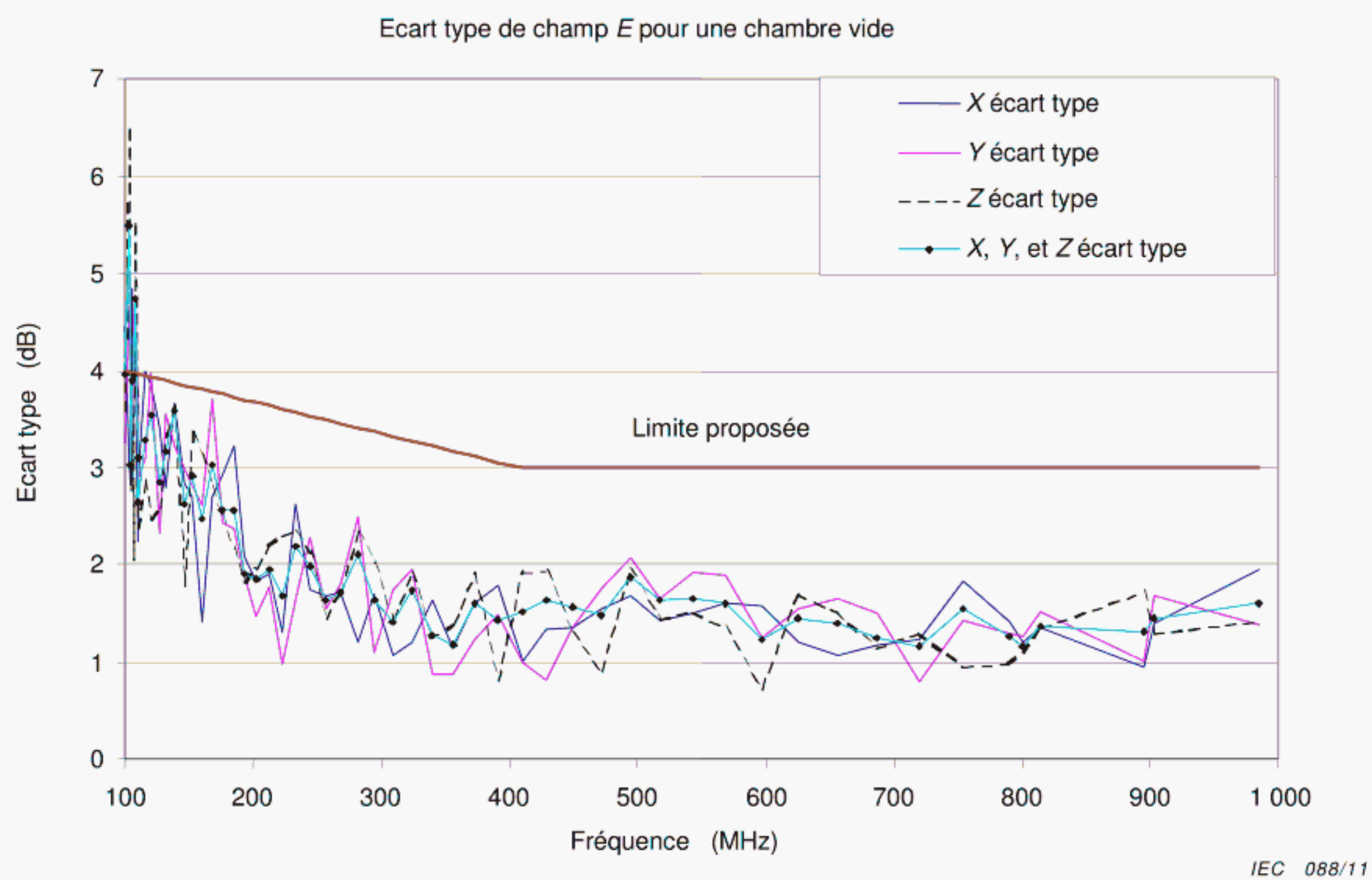
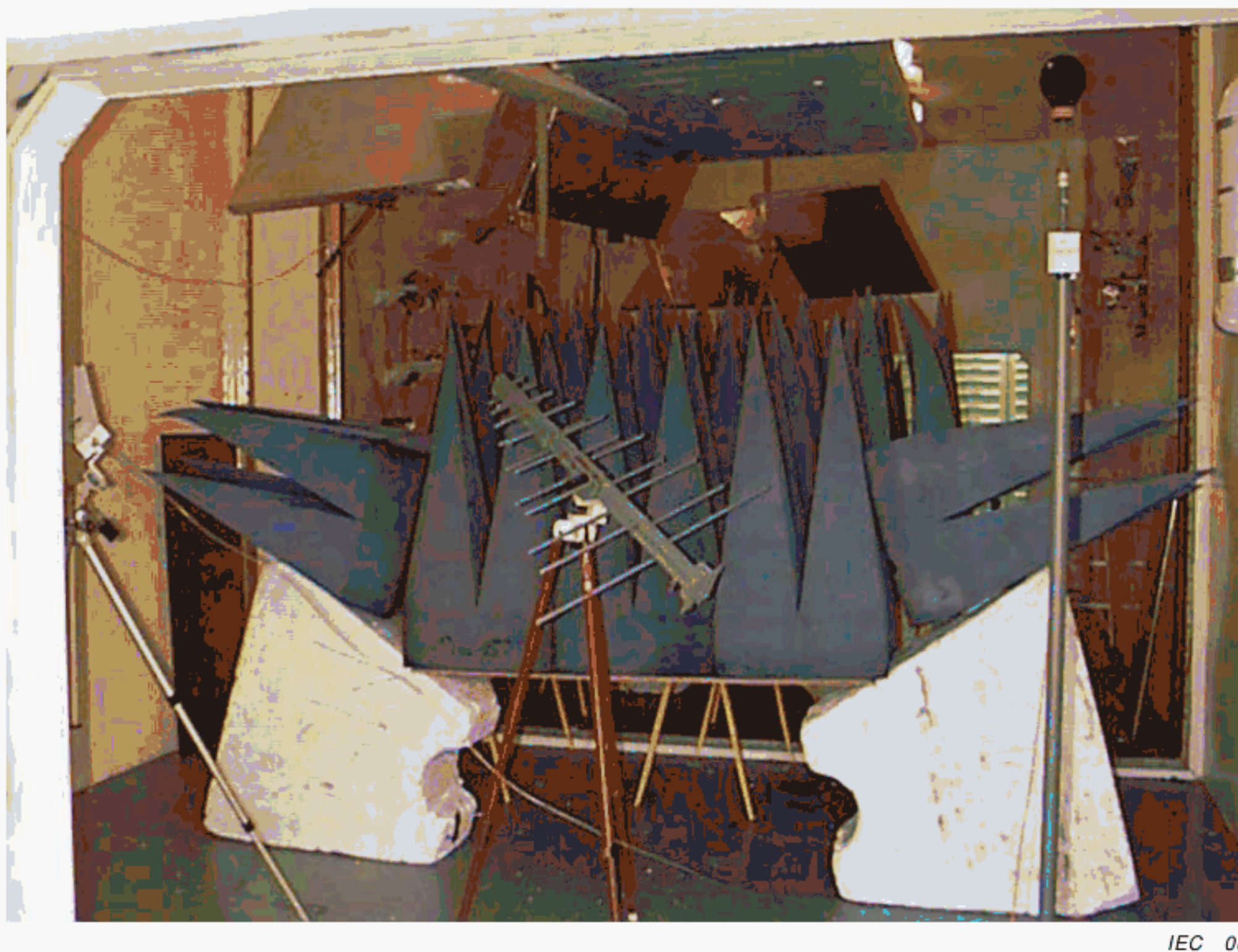


Figure A.13 – Ecart type des données pour les composantes du champ  $E$  de 8 sondes



IEC 089/11

Figure A.14 – Distribution des absorbants pour l'essai relatif aux effets de charge



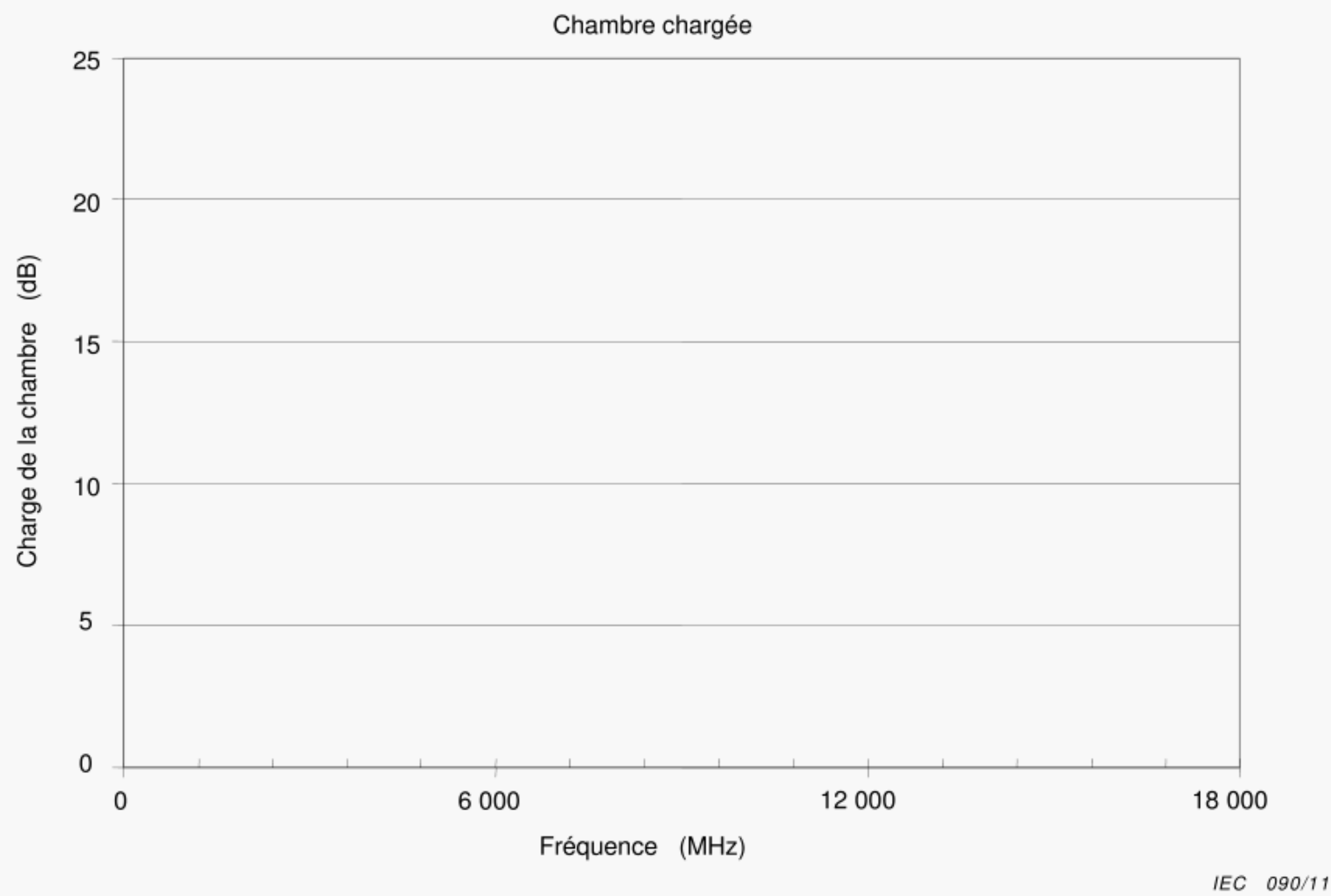


Figure A.15 – Amplitude de charge pour l'essai relatif aux effets de charge

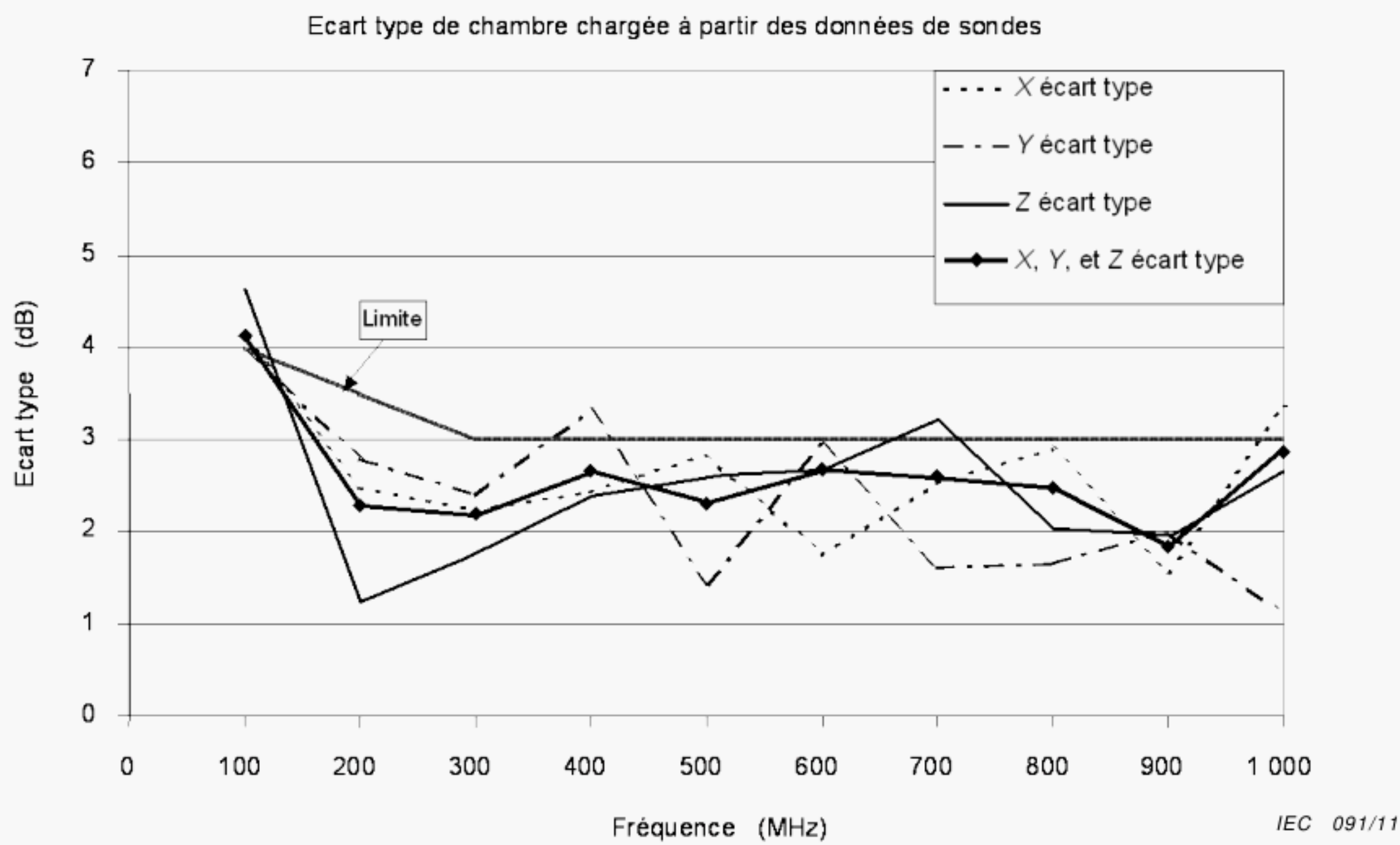


Figure A.16 – Données d'écart type pour composantes de champ électrique de huit sondes dans la chambre chargée



## Annexe B (normative)

### Validation de la chambre par brassage de modes pas à pas

#### B.1 Validation: validation de l'uniformité de champ et de la charge de la chambre

##### B.1.1 Généralités

Comme guide initial sur les exigences de performances de chambre et de puissance d'entrée, réaliser une «seule» validation de chambre vide (sans matériel en essai) en utilisant les procédures de cet article. Une validation doit être effectuée en appliquant les procédures de l'Article B.2 préalablement à chaque essai.

L'uniformité de champ de la chambre doit être vérifiée sur la première décade de la gamme de fréquences de fonctionnement. Une chambre peut être utilisée pour réaliser les essais à, et au-dessus de la fréquence à laquelle la chambre satisfait aux exigences d'uniformité de champ spécifiées dans le Tableau B.2.

##### B.1.2 Validation d'uniformité de champ

Les étapes suivantes sont nécessaires :

- (1) Vider le volume de travail (c'est-à-dire, enlever le banc d'essai et les autres artéfacts éventuels, qu'ils contribuent ou non à la charge de la chambre) et placer l'antenne de réception à un emplacement à l'intérieur du volume de travail de la chambre comme indiqué dans les notes de la Figure B.1. Régler l'instrument de mesure de l'amplitude pour contrôler l'antenne de réception sur la fréquence correcte.
- (2) Placer la sonde de champ  $E$  à un emplacement sur le périmètre du volume de travail de chambre comme indiqué à la Figure B.1.
- (3) En commençant à la fréquence d'essai la plus faible ( $f_s$ ), régler la source radioélectrique pour injecter une puissance d'entrée appropriée dans l'antenne d'émission pour obtenir une valeur lue fiable de la sonde. L'antenne d'émission ne doit pas éclairer directement le volume de travail ou l'antenne de réception et les sondes. Souvent la configuration optimale est obtenue en dirigeant l'antenne d'émission vers un coin de la chambre. La fréquence doit être dans la bande pour les antennes d'émission et de réception qui doivent être des antennes polarisées linéairement. On doit prendre soin de s'assurer que les harmoniques à l'entrée RF dans la chambre sont au moins inférieurs de 15 dB à la valeur fondamentale.

NOTE 1 Pour un fonctionnement normal, la fréquence d'essai la plus faible ( $f_s$ ) est généralement de l'ordre de 80 MHz et l'uniformité de champ est démontrée sur la première décade de fonctionnement. Si une fréquence d'essai plus faible autre que 80 MHz est choisie, par exemple pour une petite chambre utilisée pour produire des champs de valeur élevée, il convient que l'uniformité de champ de la chambre soit toujours vérifiée sur la première décade de fonctionnement. La fréquence de départ pour des mesures acceptables n'est jamais inférieure à la fréquence à laquelle la chambre satisfait aux exigences d'uniformité de champ données au Tableau B.2.

- (4) Mouvoir le(s) brasseur(s) sur un angle de 360° en pas discrets de dimensions égales (fonctionnement en mode pas à pas) de manière à ce que l'instrument de mesure de l'amplitude et la sonde de champ  $E$  capturent le nombre minimal d'échantillons comme indiqué au Tableau B.1 sur une rotation complète du brasseur. On doit veiller à ce que le temps de palier soit suffisamment long pour que les instruments de mesure de l'amplitude et les sondes de champ  $E$  aient le temps de répondre correctement.
- (5) Enregistrer les puissances maximale et moyenne (moyenne linéaire: c'est-à-dire en W, et non en dBm) du signal de réception ( $P_{\text{MaxRec}}$ ,  $P_{\text{MoyRec}}$ ), le champ maximal ( $E_{\text{Max}}$ ,  $E_{\text{Moy}}$ ) pour chaque axe de sonde de champ  $E$ , et la valeur moyenne de la puissance d'entrée ( $P_{\text{Entrée}}$ ) sur la rotation du brasseur.



NOTE 2 La valeur de la puissance d'entrée,  $P_{\text{Entrée}}$ , est la puissance incidente moyennée sur la rotation du brasseur. Il convient que le nombre d'échantillons utilisés pour déterminer la moyenne soit au moins le même que le nombre d'échantillons utilisés pour la validation de la chambre. De grandes variations de la puissance d'entrée (c'est-à-dire 3 dB ou plus) sont une indication de faibles performances de la source/amplificateur. Toutes les validations sont spécifiques à l'antenne. Changer les antennes peut rendre nulles les validations. Toutes les mesures de puissance sont liées aux bornes de l'antenne. On estime que les antennes sont des antennes à rendement élevé (c'est-à-dire, supérieures à 75 % de rendement).

- (6) Répéter la procédure ci-dessus selon des pas de fréquence à espacement logarithmique comme indiqué au Tableau B.1 jusqu'à ce que la fréquence soit d'au moins  $10 f_s$ .
- (7) Répéter pour chacun des huit emplacements de sonde représentés à la Figure B.1 et pour huit emplacements d'antennes de réception Rx (dont l'un doit être au centre du volume de travail) jusqu'à  $10 f_s$ .

NOTE 3 Les étapes 4 et 6 peuvent être interchangées si on le souhaite, à savoir avancer en fréquences à chaque pas du brasseur.

NOTE 4 Si le local et le brasseur de modes ont une symétrie géométrique forte, et si le brasseur est symétrique par rapport aux parois de la chambre, alors il convient que l'ensemble d'emplacements de sondes ne soit pas choisi de manière à présenter une symétrie cylindrique. Le positionnement des sondes en différents emplacements par rapport à la paroi la plus proche permet de supprimer plus facilement la symétrie.

- (8) Au-delà de  $10 f_s$ , seuls trois emplacements de sonde et d'antenne de réception Rx doivent être évalués. Il convient que la sonde et l'antenne maintiennent l'espace nécessaire entre elles et par rapport aux aménagements de la chambre. Un emplacement pour la sonde et l'antenne doit être le centre du volume de travail. Répéter les étapes (4) et (5) pour le reste des fréquences de validation, comme indiqué au Tableau B.1.

NOTE 5 Il convient que l'antenne de réception Rx soit déplacée vers un nouvel emplacement dans le volume de travail de la chambre pour chaque changement d'emplacement de sonde. Il convient que l'antenne soit également placée dans une nouvelle orientation par rapport à l'axe de la chambre à chaque emplacement (au moins  $20^\circ$  dans chaque axe). A titre de référence,  $x$  = longueur de la chambre (dimension la plus importante),  $y$  = largeur de la chambre et  $z$  = hauteur de la chambre. Il convient que la sonde ne soit pas nécessairement orientée le long des axes de la chambre au cours de la validation.

Il convient de s'assurer qu'une distance de séparation correcte entre l'antenne et la sonde est maintenue. Il convient que chaque emplacement de l'antenne ou de la sonde soit d'au moins  $\lambda/4$  (ou 1 m à la fréquence d'essai la plus faible, si  $\lambda/4 > 1$  m) par rapport à tout emplacement antérieur. Il convient de respecter la même séparation minimale entre l'antenne et la sonde. S'il convient que l'antenne de réception soit montée dans une position fixe au cours des essais de routine, il est suggéré que l'un des emplacements soit l'emplacement prévu de l'antenne de réception au cours des mesures ou des essais.

- (9) En utilisant les données provenant de l'étape (5), normaliser chacune des mesures de sonde de champ  $E$  maximal (à savoir, chacune des  $8 \times 3 = 24$  composantes rectangulaires inférieures à  $10 f_s$  et  $3 \times 3 = 9$  composantes rectangulaires supérieures à  $10 f_s$ ) à la racine carrée de la puissance moyenne d'entrée:

$$\vec{\vec{E}}_{\text{Norm } x,y,z} = \frac{E_{\text{Max } x,y,z}}{\sqrt{P_{\text{Entrée}}}} \quad (\text{B.1})$$

où

$E_{\text{Max } x,y,z}$  est la mesure maximale (en V/m) à partir de chaque axe de sonde (c'est-à-dire 24 mesures ou 9 mesures) dans toutes les positions générées du brasseur,

$\vec{\vec{E}}_{x,y,z}$  est le champ normalisé maximal, défini comme la mesure maximale à partir de chaque axe de sonde divisée par la racine carrée de la puissance d'entrée (en (V/m)/W<sup>0,5</sup>), et

$P_{\text{Entrée}}$  est la puissance moyenne d'entrée (en W) dans la chambre au cours de la rotation du brasseur à laquelle  $E_{\text{Max } x,y,z}$  a été enregistrée.



- (10) Pour chaque fréquence de validation, calculer la moyenne des valeurs maximales normalisées des pas du brasseur pour chaque axe de sonde, des mesures du champ  $E$ ,  $\langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle$ , comme suit.

- (a) Pour chaque fréquence inférieure à  $10 f_s$ , calculer

$$\langle \vec{E}_x \rangle_8 = \frac{\left( \sum \vec{E}_x \right)}{8}, \quad \langle \vec{E}_y \rangle_8 = \frac{\left( \sum \vec{E}_y \right)}{8}, \quad \langle \vec{E}_z \rangle_8 = \frac{\left( \sum \vec{E}_z \right)}{8} \quad (\text{B.2})$$

- (b) Pour chaque fréquence inférieure à  $10 f_s$  calculer la moyenne de la valeur maximale normalisée pour toutes les mesures de sonde de champ  $E$ , en accordant un poids égal à chaque axe (c'est-à-dire chaque composante rectangulaire),  $\langle \vec{E} \rangle_{24}$ . Ceci est réalisé en calculant la somme des 24 composantes rectangulaires (normalisées) maximales de champ  $E$ , divisée par le produit du nombre d'axes de sondes par le nombre de positions de sonde, c'est-à-dire  $3 \times 8 = 24$ :

$$\langle \vec{E} \rangle_{24} = \frac{\sum \vec{E}_{x,y,z}}{24} \quad (\text{B.3})$$

NOTE 6  $\langle \rangle$  indique la moyenne arithmétique selon un nombre de positions de sonde et/ou d'axes de sonde.

- (c) Répéter (b) pour chaque fréquence supérieure à  $10 f_s$  calculer la moyenne des valeurs maximales normalisées selon les trois positions de sonde, en donnant le même poids à chaque axe (c'est-à-dire chaque composante rectangulaire). Ceci a pour résultat le même calcul qu'en (b) ci-dessus, en remplaçant 24 par 9.
- (11) Pour chaque fréquence inférieure à  $10 f_s$ , déterminer si la chambre satisfait aux exigences d'uniformité de champ comme suit:

- (a) L'uniformité de champ est spécifiée comme un écart type par rapport à la valeur moyenne normalisée des valeurs maximales normalisées, obtenues à chacun des huit emplacements au cours d'une rotation du brasseur. L'écart type est calculé en utilisant les données provenant de chaque axe de sonde indépendamment, ainsi que l'ensemble total des données.

L'écart type est donné comme suit:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\vec{E}_i - \langle \vec{E} \rangle)^2}{n-1}} \quad (\text{B.4})$$

où

$n$  est le nombre de mesures  $i$ ,

$\vec{E}_i$  est la mesure individuelle normalisée de champ  $E$  (à la racine carrée de la puissance d'entrée), et

$\langle \vec{E} \rangle$  est la moyenne arithmétique des mesures de champ  $E$  maximal normalisées

Par exemple, pour le vecteur  $x$ :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\vec{E}_{ix} - \langle \vec{E}_x \rangle_8)^2}{8-1}} \quad (\text{B.5})$$

où

$\vec{E}_{ix}$  est la mesure individuelle de vecteur  $x$ , et



$\langle \vec{E}_x \rangle_8$  est la moyenne arithmétique des vecteurs normalisés  $E_{\text{Max } x}$  de la totalité des huit emplacements de mesure.

et pour tous les vecteurs:

$$\sigma_{24} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^3 \left( E_{m,n}^{\leftrightarrow} - \langle \vec{E} \rangle_{24} \right)^2}{24 - 1}} \quad (\text{B.6})$$

où

$\vec{E}_{m,n}$  mesures individuelles de tous les vecteurs ( $m$  = emplacements de sonde 1 à 8, et  $n$  = axes de sonde isotrope 1 à 3 (c'est-à-dire,  $x$ ,  $y$  et  $z$ ),

$\langle \vec{E} \rangle_{24}$  moyenne arithmétique des vecteurs normalisés  $E_{\text{Max } x,y,z}$  de la totalité des 24 mesures, et

$\sigma_{24}$  écart type de tous les vecteurs ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ).

L'écart type (en dB) est exprimé par rapport à la moyenne:

$$\sigma(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma + \langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle}{\langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle} \right) \quad (\text{B.7})$$

- (b) La chambre satisfait aux exigences d'uniformité de champ, sous réserve que l'écart type pour les composantes individuelles de champ et l'ensemble total de données se situent dans les limites de tolérance indiquées au Tableau B.2. Si la chambre ne satisfait pas à l'exigence d'uniformité, la chambre peut ne pas fonctionner à la fréquence inférieure désirée. Si la marge selon laquelle la chambre ne satisfait pas à l'exigence d'uniformité est faible, il peut être possible d'obtenir l'uniformité désirée comme suit:

- 1) en augmentant le nombre d'échantillons (c'est-à-dire les pas du brasseur) de 10 % à 50 %,
- 2) en normalisant les données sur la puissance d'entrée résultante moyenne de chambre ( $P_{\text{Résultante}} = P_{\text{Entrée}} - P_{\text{Réfléchie}}$ ), ou
- 3) en réduisant la taille du volume de travail.

Si la chambre dépasse l'uniformité de champ exigée, le nombre d'échantillons exigés peut être réduit, mais pas en dessous d'un minimum de 12 pas du brasseur. Ceci offre la possibilité d'optimiser chaque chambre pour le nombre minimal d'échantillons et donc pour la durée d'essai minimale.

NOTE 7 Si le brasseur n'arrive pas à fournir l'uniformité nécessaire, l'uniformité peut alors être améliorée en augmentant le nombre de brasseurs, en agrandissant le ou les brasseurs, ou en réduisant la valeur  $Q$  en ajoutant un absorbant. Il convient d'évaluer également les caractéristiques de la chambre (taille, méthode de construction et matériaux des parois) pour déterminer si la chambre est susceptible de satisfaire à cette exigence. Les chambres n'ayant pas plus de 60 à 100 modes à la fréquence d'essai la plus faible, ou à valeur de  $Q$  très élevée (telles que celles rencontrées dans les chambres en aluminium soudées) sont susceptibles de satisfaire difficilement à l'uniformité exigée à des fréquences faibles.

**IMPORTANT:** Une fois qu'une chambre a été modifiée (par exemple, par ajout d'un absorbant, etc.) ou que la procédure de validation a été modifiée (par exemple, nombre de pas du brasseur modifié, etc.) pour obtenir une caractéristique désirée, cette configuration et/ou cette procédure doivent rester identiques pour la durée de l'essai afin que cette validation reste valable.



### B.1.3 Validation de l'antenne de réception

Le facteur de validation de l'antenne de réception pour une chambre vide est déterminé dans le but de fournir une base de comparaison avec une chambre chargée (Article B.2).

Calculer le facteur de validation d'antenne (AVF) de réception pour chaque fréquence en utilisant l'équation suivante:

$$AVF = \left\langle \frac{P_{\text{MoyRec}}}{P_{\text{Entrée}}} \right\rangle_{8 \text{ pour } \leq 10 f_0 \quad \text{ou} \quad 3 \text{ pour } > 10 f_0} \quad (\text{B.8})$$

où  $P_{\text{Entrée}}$  est la puissance d'entrée moyenne de (B.1.2 (5)) pour l'emplacement correspondant auquel la puissance moyenne reçue ( $P_{\text{MoyRec}}$ ) provenant de [B.1.2(5)] a été mesurée. Le facteur de validation est nécessaire pour corriger les mesures d'antenne pour plusieurs effets y compris le rendement d'antenne.

NOTE  $\langle \rangle$  indique la moyenne arithmétique, c'est-à-dire  $\langle P_{\text{MoyRec}} \rangle_8 = (\sum P_{\text{MoyRec}})/8$  évalué en 8 emplacements de sonde si la fréquence est inférieure à  $10 f_s$ , ou en 3 emplacements si la fréquence est supérieure à  $10 f_s$ .

### B.1.4 Perte d'insertion de la chambre

La perte d'insertion ( $IL$ ) de la chambre dans le cas de la chambre vide, est déterminée pour fournir des informations nécessaires aux calculs exigés par les autres annexes.

Calculer la perte d'insertion de la chambre pour chaque fréquence en utilisant l'équation suivante:

$$IL = \left\langle \frac{P_{\text{MaxRec}}}{P_{\text{Entrée}}} \right\rangle_{8 \text{ pour } \leq 10 f_0 \quad \text{ou} \quad 3 \text{ pour } \geq 10 f_0} \quad (\text{B.9})$$

où  $P_{\text{Entrée}}$  est la puissance d'entrée moyenne de (B.1.2 (5)) pour l'emplacement correspondant, auquel la puissance maximale reçue ( $P_{\text{MaxRec}}$ ) provenant de (B.1.2 (5)) a été mesurée.

NOTE  $\langle \rangle$  indique la moyenne arithmétique, c'est-à-dire  $\langle P_{\text{MaxRec}} \rangle_8 = (\sum P_{\text{MaxRec}})/8$  évalué en 8 emplacements de sonde si la fréquence est inférieure à  $10 f_s$ , ou en 3 emplacements si la fréquence est supérieure à  $10 f_s$ .

### B.1.5 Estimation du champ $E$ de chambre en utilisant les antennes

La validation de la chambre vide indiquée en B.1.2 est fondée sur les valeurs lues des sondes de champ  $E$ . Le champ  $E$  de chambre peut être estimé à partir des mesures utilisant les antennes. Cette procédure alternative est contenue dans l'Annexe A.

NOTE Des désaccords importants sont attendus aux fréquences peu élevées. Ceci est dû à la charge causée par les antennes d'émission et de réception. Pour cette raison, l'accord entre les deux méthodes n'est pas attendu à des fréquences où, la différence entre la puissance d'entrée de chambre et la puissance maximale reçue mesurée de l'antenne de référence, est inférieure ou égale à 10 dB.

### B.1.6 Vérification de la charge maximale de la chambre

Pour déterminer si la chambre est affectée par un matériel en essai qui «charge» la chambre, réaliser une vérification unique de l'uniformité de champ de la chambre dans des conditions de charge simulées. Il est suggéré de réaliser la validation de la chambre «chargée» une seule fois au cours de la durée de vie de la chambre ou après une modification importante de la chambre. Avant chaque essai, une validation doit être réalisée en utilisant les procédures décrites à l'Article B.2.



- (1) Installer, à des emplacements aléatoires dans le volume de travail de la chambre, une quantité suffisante d'absorbants pour charger la chambre au moins au niveau attendu au cours des essais normaux (il convient qu'un facteur de changement d'AVF égal à 16 (12 dB) soit considéré comme une quantité nominale de charge).

NOTE Chaque chambre est unique. La manière la plus facile pour déterminer la quantité d'absorbant nécessaire est celle de l'essai et de l'erreur.

- (2) Répéter la validation indiquée en B.1.2 en utilisant les huit emplacements de la sonde de champ  $E$ . Il convient de veiller à s'assurer que la sonde de champ  $E$  et l'antenne de réception maintiennent une distance supérieure à  $\lambda/4$  par rapport à tout absorbant. Déterminer la charge de chambre en comparant le facteur de validation d'antenne (AVF) de la chambre vide et celui de la chambre «chargée» (B.1.3)

$$Charge = \frac{AVF_{\text{Chambre vide}}}{AVF_{\text{Chambre chargée}}} \quad (\text{B.10})$$

- (3) Répéter le calcul de l'uniformité de champ en utilisant les données provenant des huit emplacements de la sonde de champ  $E$ .

Si la charge de la chambre entraîne le dépassement par la composante rectangulaire des champs de l'écart type autorisé, ou si l'écart type pour tous les vecteurs (à savoir,  $\sigma_{24}$ ) dépasse l'écart type autorisé (voir Tableau B.2), alors la chambre a été chargée à un point tel que l'uniformité de champ est inacceptable. Dans ce cas, la quantité de charge de chambre doit être réduite et l'évaluation des effets de charge doit être répétée.

## B.2 Validation: vérification des performances de la chambre avec le matériel en essai en place

Avant chaque essai, le matériel en essai (EUT) et l'équipement de support étant placés dans la chambre, réaliser une validation de la chambre conformément à la procédure suivante.

- (1) Placer l'antenne de réception à un emplacement à l'intérieur du volume de travail de la chambre et maintenir 1 m (ou  $\lambda/4$  à la fréquence d'essai la plus faible) de séparation entre le matériel en essai, l'équipement de support, etc., comme indiqué dans cette annexe pour le type d'essai effectué. Régler les instruments de mesure de l'amplitude pour contrôler l'antenne de réception à la bonne fréquence.
- (2) En commençant à la fréquence d'essai la plus faible ( $f_s$ ), régler le niveau de la source radioélectrique pour injecter une puissance d'entrée appropriée ( $P_{\text{Entrée}}$ ) dans l'antenne d'émission. On doit veiller à s'assurer que les harmoniques à l'entrée RF dans la chambre sont au moins inférieurs de 15 dB à la valeur fondamentale.
- (3) Faire fonctionner la chambre et le brasseur, en tenant compte des caractéristiques additionnelles potentielles définies à l'Article B.1 qui ont été requises pour satisfaire au critère d'homogénéité. On doit veiller à s'assurer que le temps de palier soit suffisamment long pour être sûr que l'équipement de mesure de l'amplitude ait le temps de répondre correctement.
- (4) Enregistrer l'amplitude maximale et l'amplitude moyenne du signal de réception ( $P_{\text{MaxRec}}$ ,  $P_{\text{MoyRec}}$ ), et la valeur moyenne de la puissance d'entrée,  $P_{\text{Entrée}}$ . Il convient que les instruments de mesure aient un niveau plancher de bruit d'au moins 20 dB inférieur à la puissance maximale reçue ( $P_{\text{MaxRec}}$ ) pour collecter des données moyennes précises.
- (5) Répéter la procédure ci-dessus pour chaque fréquence d'essai comme cela est défini dans le plan d'essai.
- (6) Calculer le facteur de validation de la chambre (CVF) pour chaque fréquence en utilisant l'équation suivante:

$$CVF = \left\langle \frac{P_{\text{MoyRec}}}{P_{\text{Entrée}}} \right\rangle_n \quad (\text{B.11})$$

où

CVF est la puissance moyenne reçue normalisée sur une rotation du brasseur avec le matériel en essai et l'équipement de support présents,



- $P_{\text{MoyRec}}$  est la puissance moyenne reçue sur une rotation du brasseur de l'étape (4),  
 $P_{\text{Entrée}}$  est la puissance incidente moyennée sur une rotation du brasseur de l'étape (4), et  
 $n$  est le nombre d'emplacements d'antenne pour lesquels le facteur de validation de la chambre est évalué. Seul un emplacement est exigé; cependant, des emplacements multiples peuvent être évalués et les données peuvent être moyennées sur le nombre d'emplacements.

- (7) Calculer le facteur de charge de chambre ( $CLF$ ) pour chaque fréquence en utilisant l'équation suivante:

$$CLF = \frac{CVF}{AVF} \quad (\text{B.12})$$

où

$CVF$  est le rapport de la puissance reçue moyenne sur la puissance d'entrée obtenue à l'étape (6) ci-dessus, et

$AVF$  est le rapport de la puissance reçue moyenne sur la puissance d'entrée obtenue au cours de la validation de l'antenne spécifiée en B.1.2 (5). Une interpolation est nécessaire pour obtenir  $AVF$ .

Si la valeur réciproque de l'amplitude du facteur de charge de chambre dépasse la charge mesurée en B.1.2 (5) dans une proportion supérieure à celle attendue compte tenu de l'incertitude de l'appareil de mesure, il est possible que la chambre soit chargée à un point tel que l'uniformité de champ est affectée. Dans un tel cas, les mesures d'uniformité de la chambre indiquées en B.1.2 doivent être répétées avec le matériel en essai en place, ou avec une charge simulée équivalente au matériel en essai.

**NOTE** Si la valeur de  $P_{\text{MoyRec}}$  mesurée à l'Article B.2 (5) se situe dans les valeurs (c'est-à-dire qu'elle n'est ni supérieure ni inférieure) enregistrées pour la totalité des huit emplacements en B.1.2 (5), le calcul du facteur de charge de chambre n'est pas nécessaire et il convient d'estimer sa valeur à 1. Si la dynamique du système de mesure a été insuffisante pour obtenir des mesures précises de la puissance reçue moyenne, le facteur de validation d'antenne et le facteur de validation de chambre peuvent être recalculés en utilisant la puissance maximale reçue, et ensuite utilisés pour calculer le facteur de charge de chambre. Si la puissance maximale reçue est utilisée, il convient qu'elle soit utilisée pour recalculer à la fois le facteur de validation d'antenne et le facteur de validation de chambre.

**AVERTISSEMENT:** Ceci s'applique UNIQUEMENT au calcul du facteur de charge de chambre. NE PAS utiliser l'un de ces facteurs fondés sur les valeurs maximales pour déterminer les autres paramètres éventuels !

### B.3 Validation de la valeur $Q$ et de la constante de temps

Pour s'assurer que la réponse dans le temps de la chambre est suffisamment rapide pour répondre aux essais de forme d'onde pulsée, la détermination de la constante de temps de la chambre doit être réalisée en utilisant la procédure suivante:

- (1) En utilisant le facteur de validation de chambre ( $CVF$ ) de l'Equation (B.11), calculer le facteur de qualité,  $Q$ , pour chaque fréquence en utilisant:

$$Q = \left( \frac{16\pi^2 V}{\eta_{\text{Tx}} \eta_{\text{Rx}} \lambda^3} \right) (CVF) \quad (\text{B.13})$$

où

$\eta_{\text{Tx}}, \eta_{\text{Rx}}$  sont respectivement les facteurs de rendement d'antenne pour les antennes d'émission et de réception, et on peut estimer avec prudence qu'ils sont de 0,75 pour une antenne log périodique et de 0,9 pour une antenne cornet,

$V$  est le volume de la chambre (en  $\text{m}^3$ ),

$\lambda$  est la longueur d'onde dans l'espace libre (en m) à la fréquence spécifique, et

$CVF$  est le facteur de validation de chambre.

**NOTE** Si la valeur de  $P_{\text{MoyRec}}$  mesurée à l'Article B.2 (4) se situait dans les limites des valeurs (c'est-à-dire ni supérieure, ni inférieure) enregistrées pour la totalité des huit emplacements en B.1.2 (5), le calcul du facteur de



charge de chambre n'était pas nécessaire et sa valeur estimée à 1. Dans ce cas, il convient que le facteur de validation d'antenne spécifié en B.1.2 soit utilisé en lieu et place du facteur de validation de la chambre pour le calcul du facteur  $Q$  de la chambre.

- (2) Calculer la constante de temps de la chambre,  $\tau$ , (en s) pour chaque fréquence en utilisant:

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f} \quad (\text{B.14})$$

où

$Q$  est la valeur calculée à l'étape (1) ci-dessus, et

$f$  est la fréquence d'essai (en Hz).

- (3) Si la constante de temps de la chambre est supérieure à 0,4 de la largeur d'impulsion pour l'essai de modulation pour plus de 10 % des fréquences d'essai, un absorbant doit être ajouté à la chambre ou la largeur d'impulsion doit être augmentée. Si un absorbant est ajouté, répéter la mesure de la valeur  $Q$  et le calcul jusqu'à satisfaire à l'exigence de constante de temps avec le moins d'absorbant possible. Un nouveau facteur de charge de chambre doit être défini si un absorbant se révèle nécessaire.

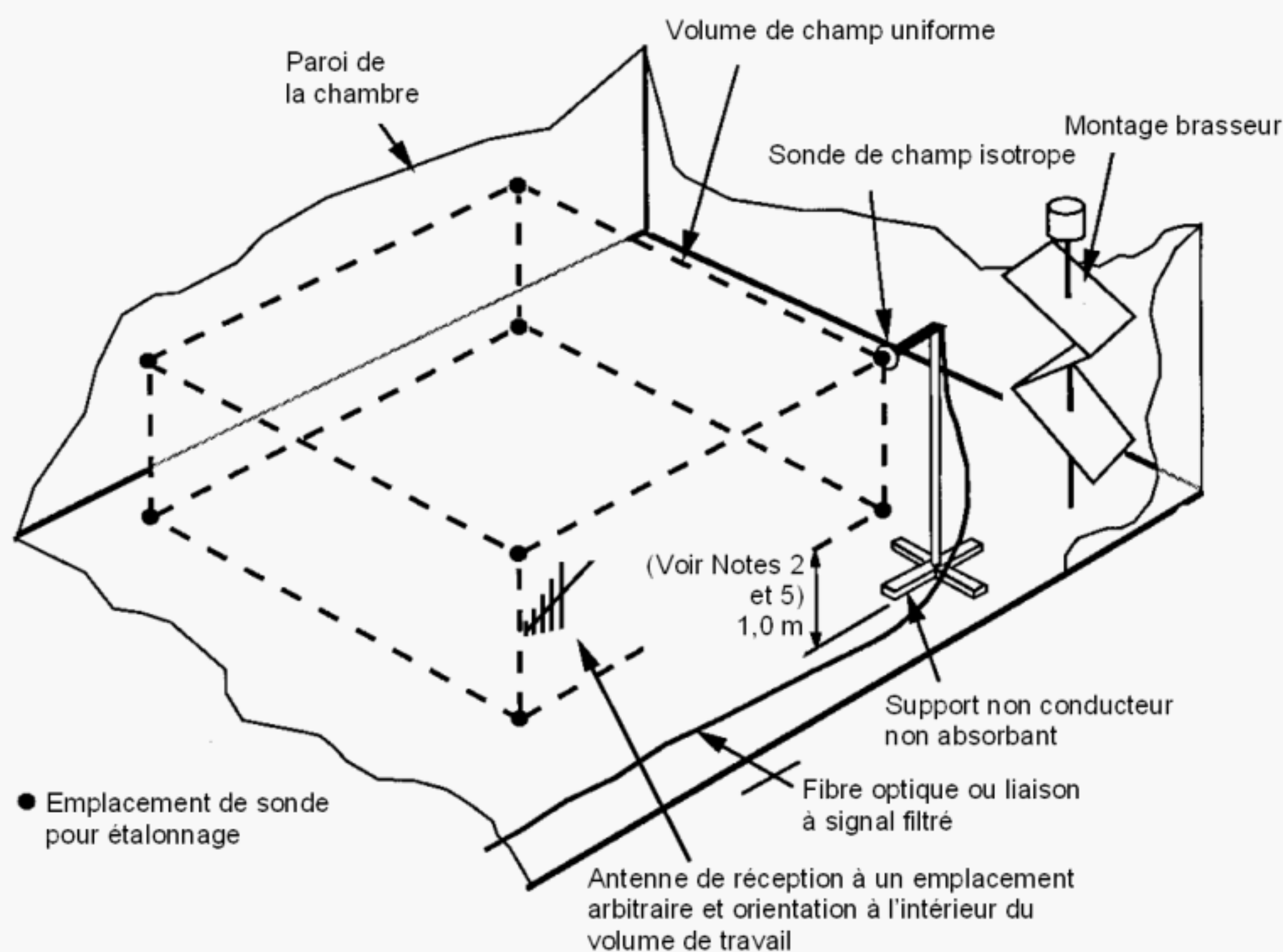
**Tableau B.1 – Exigences d'échantillonnage**

Gamme de fréquences	Nombre minimal d'échantillons <sup>a</sup> exigés pour la validation et l'essai <sup>d</sup>	Nombre de fréquences <sup>b</sup> exigées pour la validation
$F_s$ à $3 f_s$ <sup>c</sup>	12	20
$3 f_s$ à $6 f_s$	12	15
$6 f_s$ à $10 f_s$	12	10
Supérieure à $10 f_s$	12	20/décade
<sup>a</sup> Le nombre minimal de pas du brasseur est de 12 pour toutes les fréquences. Pour de nombreuses chambres, il est nécessaire d'augmenter le nombre de pas du brasseur aux basses fréquences. Le nombre maximal de pas du brasseur est le nombre d'échantillons indépendants qu'un brasseur donné peut fournir. Ce nombre varie avec la fréquence et doit être vérifié lors de la mise en service de la chambre. Si la chambre ne satisfait pas à l'exigence d'uniformité, le nombre de pas du brasseur peut être augmenté jusqu'au nombre d'échantillons de brasseur indépendants. La Figure A.12 présente un exemple de nombre de pas du brasseur plus important. <sup>b</sup> Logarithmiquement espacées. <sup>c</sup> $f_s$ = fréquence de départ (voir A.1.3 pour la fréquence utilisable la plus faible). <sup>d</sup> Le séquençement du brasseur utilisé pour la validation de la chambre doit être le même que celui utilisé pour les essais ultérieurs.		

**Tableau B.2 – Exigences de tolérance pour l'uniformité du champ**

Gamme de fréquences MHz	Exigences de tolérance pour l'écart type
80 à 100	4 dB <sup>a</sup>
100 à 400	4 dB à 100 MHz avec réduction linéaire jusqu'à 3 dB à 400 MHz <sup>a</sup>
Supérieure à 400	3 dB <sup>a</sup>
<sup>a</sup> Trois fréquences par octave au maximum peuvent dépasser l'écart type autorisé dans une proportion ne dépassant pas 1 dB de la tolérance exigée.	





IEC 092/11

NOTE 1 Il convient que la validation des champs à l'intérieur de la chambre réverbérante soit consister en huit emplacements de sonde.

NOTE 2 Les emplacements englobent un volume appelé « volume de travail » de la chambre. Il est recommandé que les surfaces délimitant le volume de travail ne soient pas à moins de 1 m (voir la Note 5) de toute surface de la chambre, de toute antenne de génération de champ, ou du montage du brasseur. Pour les besoins de validation et de contrôle, l'antenne de réception peut être située à tout emplacement à l'intérieur du volume de travail. Il convient que l'antenne d'émission soit dans toute la mesure du possible dirigée vers un coin de la chambre. Diriger l'antenne vers le brasseur est également acceptable. Il convient que l'emplacement de l'antenne d'émission reste fixe au cours de la validation et des essais. Il convient que l'emplacement de l'antenne d'émission soit le même pour la validation et les essais.

NOTE 3 La taille du volume de travail peut être adaptée pour correspondre au volume maximal de travail de la chambre ou aux éléments à soumettre aux essais. Il est recommandé que la taille du volume de travail soit adaptée pour correspondre au volume maximal de travail; dans le cas contraire, une nouvelle validation est nécessaire si des éléments de plus grande taille sont soumis aux essais. Il n'est pas nécessaire que le volume de travail soit de forme rectangulaire. Pour les formes arbitraires, il peut être nécessaire d'ajouter des points de validation de manière à définir correctement le volume de travail.

NOTE 4 Il convient qu'une sonde isotrope, qui fournit l'accès à chacun des trois axes, soit utilisée pour réaliser les validations. Une antenne dipolaire électriquement courte (c'est-à-dire inférieure à  $\lambda/3$ ) étalonnée peut être utilisée comme alternative, sous réserve que l'antenne dipolaire soit positionnée selon trois orientations mutuellement perpendiculaires pour chaque emplacement de mesure. Il convient de veiller à s'assurer que le dipôle n'est pas influencé par son câble de connexion. Un système de mesure isolé optiquement (sonde ou dipôle isotrope) est recommandé.

NOTE 5 La distance de séparation minimale peut être réduite sous réserve que la séparation soit supérieure à  $\lambda/4$  pour la fréquence d'essai la plus faible. Les distances de séparation de moins de  $\lambda/4$  ne sont recommandées en aucun cas.

**Figure B.1 – Emplacements de sonde pour la validation de la chambre**



## **Annexe C** (normative)

### **Validation de la chambre et essais par brassage de modes continu**

#### **C.1 Validation de la chambre par brassage de modes continu**

##### **C.1.1 Généralités**

La présente annexe se rapporte à la méthode de fonctionnement avec brassage de modes continu (rotation uniforme continue) par opposition à la validation par brassage de modes pas à pas (rotation à pas discrets) détaillée à l'Annexe B. En brassage de modes continu, on doit veiller à s'assurer que la vitesse du brasseur est telle que la chambre, les capteurs et le matériel en essai sont capables de répondre de manière adéquate au champ à modification permanente, de manière à éviter les effets inacceptables (y compris le calcul de la moyenne).

Pour une vitesse de rotation fixe du brasseur, la vitesse de modification du champ varie en fonction de la fréquence d'excitation. Ceci implique que le brasseur doit être changé afin de tenir compte des variations de champ à la fréquence d'essai la plus élevée, ou la vitesse de rotation doit être fonction de la fréquence d'excitation.

Le brasseur ou la roue à pales doit être entraîné(e), soit par un moteur pas à pas (comme celui utilisé pour le mode pas à pas), soit par un moteur à commande continue, à condition que la vitesse du moteur puisse être contrôlée pour s'adapter aux essais des équipements avec différents temps de réponse ou différentes durées de cycle. La technique du brassage de modes continu est potentiellement plus rapide que la technique du brassage de modes pas à pas, à condition que le matériel en essai soit exposé de manière appropriée à un champ variant de manière continue. Si, en fait, la réponse du matériel en essai/la durée du cycle est rapide, par rapport à la vitesse de modification du champ, la technique du mode continu peut être plus complète dans la mesure où tous les états intermédiaires du brasseur sont également couverts, tout en évitant les effets dus aux transitions de champ générées au cours des phases de démarrage, d'arrêt et d'accélération avec brassage de modes pas à pas.

Dans la mesure où la rotation d'un brasseur est continue, le champ de la chambre doit être échantillonné sur un intervalle de temps dont la longueur et la vitesse d'échantillonnage doivent être choisies de manière judicieuse. Un intervalle trop court peut ne pas permettre à la sonde ou au récepteur de fournir une réponse suffisamment rapide pour capturer la valeur de champ réelle instantanée ou peut générer des effets secondaires ayant pour origine un fenêtrage. D'autre part, un intervalle trop long génère un moyennage uniforme ou pondéré des valeurs de champ avec la durée, de sorte que des écarts importants par rapport à la valeur moyenne peuvent ne pas être détectés. Un échantillonnage trop lent peut générer une ambiguïté des données de balayage mesurées du brasseur. Le système d'acquisition de données pour le fonctionnement avec brassage de modes continu doit être capable de traiter les données à une vitesse suffisamment élevée et pour un nombre suffisamment élevé, qui limite la vitesse d'échantillonnage maximale et la vitesse de brassage dans la pratique.

La procédure de validation de chambre exposée à l'Annexe B peut être utilisée pour valider une chambre dans le but de réaliser des essais en mode continu. Le brasseur effectue à présent une rotation uniforme et continue, le champ étant par ailleurs échantillonné par les sondes ou les capteurs au cours d'une rotation ou d'une rotation partielle. La principale différence réside dans l'utilisation de capteurs à trois axes au cours de la validation en 8 points du volume de la chambre. Au minimum, la technique de validation en mode pas à pas telle qu'elle est détaillée à l'Annexe B peut être utilisée pour fournir à la fois des données d'uniformité pour la chambre, et des données de validation de chambre en champ *E*.



### C.1.2 Considérations d'utilisation de la sonde de champ en brassage de modes continu

La majorité des sondes de champ  $E$  à 3 axes (étalonnées en espace libre) disponibles dans le commerce, n'ont pas un taux d'échantillonnage adapté pour permettre leur utilisation au cours de la validation de chambre en mode continu. Si ces sondes doivent être utilisées, la vitesse du brasseur doit être suffisamment lente pour permettre aux capteurs étalonnés de répondre de manière adéquate au champ modifié. D'autres capteurs étalonnés à réponse rapide sont disponibles. Bien que ces capteurs soient très souvent à axe unique, ils peuvent être utilisés sous réserve d'être réorientés selon 3 axes orthogonaux à chacune des 8 positions lors de la validation du volume. Quel que soit le type de sonde utilisé, le nombre d'échantillons indépendants ( $N$ ) recueillis par la sonde sur une rotation du brasseur doit être connu.

Deux problèmes d'échantillonnage courants pour les sondes types sont le lissage et l'échantillonnage par crête, générant des niveaux de champ apparemment inférieur et supérieur, respectivement. Les deux problèmes entraînent également une uniformité de champ perçue plus grande [1]<sup>5</sup>. Il convient de minimiser ces problèmes en utilisant des capteurs plus rapides et/ou des vitesses de rotation plus lentes.

Si plusieurs capteurs sont placés dans la chambre simultanément, il convient que leurs vitesses d'échantillonnage soient identiques. Dans le cas contraire, les dispositifs peuvent ne pas être exposés au même champ de crête attendu.

La rotation du brasseur à une vitesse suffisamment faible, et à condition que la chambre soit réverbérante dans des conditions appropriées, doit permettre de satisfaire aux inégalités suivantes:

$$T_s \ll \tau_{ch} \ll \tau_p \text{ et } T_s \ll \tau_{Rx} \ll \tau_p \quad (C.1)$$

où

- $T_s$  est la période (en s) de l'excitation d'onde entretenue, généralement de l'ordre ns;  $T_s = 1/f_0$ ,
- $\tau_{ch}$  est le temps de descente effectif (calculé sur la moyenne des modes) de la chambre non soumise au brasseur (en s), généralement de l'ordre  $\mu s$ ;  $\tau_{ch} = Q(f)/(2\pi f_0)$ ,
- $\tau_p$  est la constante de temps du processus de brassage, qui dépend de la vitesse de rotation  $\Omega_m$  du brasseur et du nombre maximal d'échantillons indépendants  $N$  généré avec un brassage de modes pas à pas, avec positionnement de la même roue à pales dans la même chambre, généralement de l'ordre s;  $\tau_p = 2\pi/(N \Omega_m)$ ,
- $\tau_{Rx}$  est la constante de temps du capteur (sonde, antenne, récepteur), généralement de l'ordre  $\mu s$  à ms.

NOTE 1 Le nombre d'échantillons indépendants,  $N$ , ne peut pas dépasser le nombre correspondant qu'un brasseur pas à pas est capable de fournir.

NOTE 2 Avec les progrès de la technologie des sondes et des capteurs, les capteurs rapides « en temps réel » (à axe unique ou à 3 axes) peuvent être ou seront bientôt disponibles, pour permettre la réalisation de l'étalonnage de volume sur 8 points en utilisant les techniques de brassage de modes continu. Ceci peut nécessiter la dérive de l'acquisition des données par défaut par la commande logicielle de la sonde (par exemple, réduction ou suppression du programme de rééchantillonnage d'un point de donnée unique) afin de réaliser un échantillonnage suffisamment dense de la trace de balayage continue du brasseur.

NOTE 3 La technique d'étalonnage définie à l'Annexe B peut être modifiée pour permettre l'utilisation de capteurs étalonnés (dans l'espace libre) au cours d'un étalonnage de volume en mode continu.

Pour que le champ de cavité reste dans le même régime permanent que lors d'un fonctionnement en mode pas à pas (en ne tenant pas compte des transitions pas par pas), une limite supérieure applicable à la vitesse de brassage admissible est donnée par la relation d'ordre décimal

<sup>5</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article C.5, Documents de référence, à la fin de cette annexe.



$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{8f^2 Q N^{0,5} V} \quad (\text{C.2})$$

où

$\Omega_m(f)$  est la vitesse de brassage mécanique (en tours par seconde (tr/s)) à la fréquence de fonctionnement  $f$  (en Hz),

$c$  est la vitesse de la lumière environ  $3 \times 10^8$  m/s,

$Q$  est le facteur de qualité de la chambre à la fréquence  $f$ ,

$N$  est le nombre maximal d'échantillons indépendants à la fréquence  $f$  (voir Article A.3),

$V$  est le volume de travail de la chambre (en m<sup>3</sup>).

Par exemple, pour une chambre avec  $V = 100 \text{ m}^3$ ,  $f = 1 \text{ GHz}$ ,  $Q = 10^4$  et  $N = 1\,000$  requiert  $\Omega_m(f) < 0,1 \text{ tr/s}$ .

## C.2 Essais d'immunité pour un fonctionnement en mode continu

La technique de mesure en mode continu peut être employée au cours de l'essai du matériel à condition que la chambre remplisse les critères d'uniformité de la chambre en termes d'écart type. Au cours de l'essai, seules une antenne passive de référence et la puissance d'entrée de la chambre sont utilisées pour établir les champs à l'intérieur de la chambre. Au cours du fonctionnement en mode continu, le nombre d'échantillons (intervalles de réponse du matériel en essai) peut être augmenté ou réduit de manière importante, en fonction de la vitesse de rotation du brasseur et du temps de réponse du matériel en essai. Si le nombre d'échantillons est augmenté, alors la valeur attendue du champ maximal (rayonné ou reçu) augmentera, et l'uniformité de champ de la chambre sera améliorée (voir C.3.3 et A.4.4). Les paramètres qui exigent un examen attentif sont le rapport de la période de brassage sur le temps de relaxation des cavités et le rapport de la période de brassage sur le temps de réponse/durée de cycle du matériel en essai [2]. Si les vitesses de brassage sont relativement élevées, alors ceci change la nature fondamentale et les caractéristiques du champ d'essai, du fait que les effets non stationnaires se produisent alors [3, 4].

Souvent, aucune information préalable n'est disponible en ce qui concerne le temps de réponse ou les durées de cycle du matériel en essai. Compte tenu de ce manque d'informations, la mesure en mode continu doit être appliquée uniquement en veillant tout particulièrement au temps de réponse minimal et à la vitesse du brasseur.

NOTE 1 Un matériel en essai, une antenne ou une sonde à réponse rapide sont définis comme un matériel capable d'obtenir au moins un échantillon par changement de 1 dB dans le champ lorsque celui-ci se situe dans les limites de 3 dB du champ maximal. Pour les matériels à temps de réponse lent/à durée de cycle lente, pour lesquels il est nécessaire de prévoir un temps prédéfini à chaque pas du brasseur, la technique en mode pas à pas peut être plus rapide et plus précise.

NOTE 2 Lors de l'évaluation du matériel en essai, il convient que le temps de réponse de ce dernier (connu ou estimé) soit similaire à celui des capteurs lors de l'étalonnage, produisant un nombre similaire total d'échantillons.

Certains dispositifs sont plus sensibles au champ moyen qu'au champ maximal (par exemple, effets thermiques) [1]. Dans les cas où le matériel en essai est capable d'effectuer un regroupement (moyenne ou intégration) du champ auquel il est exposé, les brasseurs tournant rapidement peuvent être intéressants. Dans de tels cas, l'essai ne s'effectue plus sur le champ maximal mais sur le champ moyen de la chambre. La vitesse maximale autorisée pour le brasseur n'est pas définie avec cette technique. Une vitesse de brassage minimale définit alors le niveau d'incertitude du champ d'essai.

La détermination de la vitesse appropriée de rotation du brasseur est la clé de l'utilisation de la technique par brassage de modes continu. Cette vitesse dépend de la fréquence et de la chambre  $Q$  [2]. La vitesse de rotation doit permettre un délai suffisant pour que le champ de la chambre décèle les changements des limites de cavité, pour que le matériel en essai puisse répondre et pour que tout mauvais fonctionnement puisse être détecté par les



instruments. Souvent, le matériel en essai doit présenter un mauvais fonctionnement répétable pour déterminer si la vitesse de rotation sélectionnée du brasseur est appropriée. Dès qu'un mauvais fonctionnement est survenu, la vitesse de rotation peut être ajustée, augmentée ou diminuée, pour déterminer si un changement du seuil de mauvais fonctionnement se produit. Tout changement important du seuil de mauvais fonctionnement indique un problème avec la vitesse originelle de rotation du brasseur. La technique par brassage de modes continu est la plus appropriée pour des matériels en essai qui ont un temps de réponse très bref (c'est-à-dire rapide).

Il n'appartient pas au domaine d'application de la présente procédure d'essai de fournir des limites précises sur la vitesse du brasseur et des procédures d'essai détaillées pour assurer que la vitesse du brasseur est suffisamment lente (ou rapide) pour que le matériel en essai réponde. A titre de ligne directrice, la réponse adéquate d'un matériel en essai (EUT) soumis à un essai d'immunité exige que la vitesse du brasseur satisfasse

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{16\pi f^3 \tau_{\text{EUT}} N^{0,5} V} \quad (\text{C.3})$$

où

$\tau_{\text{EUT}}$  est la constante de temps maximale (temps de réponse maximale) (en secondes) applicable à toute composante critique du matériel en essai.

Par exemple, pour une chambre avec  $V = 100 \text{ m}^3$ ,  $f = 1 \text{ GHz}$ ,  $N = 1\,000$  et  $\tau_{\text{EUT}} = 1 \mu\text{s}$  requiert  $\Omega_m(f) < 0,16 \text{ tr/s}$ .

En fonction de l'objectif de l'essai, de la nature de la quantité (valeurs moyennes par opposition à crêtes), de la longueur de l'intervalle de moyennage du temps, et du comportement particulier de l'EST, des écarts par rapport à la limite supérieure dans l'Article C.3 peuvent être permis mais doivent être suffisamment justifiés.

Si la largeur de bande du matériel en essai est inférieure à la largeur de bande Q de la chambre à la fréquence d'essai, alors [2] s'applique. Dans la pratique, la réponse en fréquence et la constante de temps d'un matériel en essai ne sont souvent pas connues et sont par ailleurs difficiles à mesurer ou à estimer, ou il peut exister plusieurs constantes de ce type d'ordres de grandeur différents. Si l'essai implique un signal d'excitation modulée, alors la période du signal ne doit pas être supérieure au temps de corrélation, qui exige

$$\Omega_m < \frac{B}{2\pi N} \quad (\text{C.4})$$

où

$\Omega_m$  est la vitesse de brassage mécanique (en tours par seconde) à la fréquence centrale (porteuse)  $f$ ,

$B$  est soit la largeur de bande (en Hz) de l'excitation ( $f - B/2$ ,  $f + B/2$ ) soit  $BW_Q$ , laquelle des deux est la plus grande.

La technique (mode continu ou mode pas à pas) doit être exposée et faire l'objet d'un accord dans le plan d'essai individuel du matériel. Les justifications pour l'utilisation de l'une ou l'autre des techniques de chambre réverbérante (mode continu ou mode pas à pas) doivent être enregistrées dans le rapport d'essai pour le matériel en essai.

Les comités de produits doivent donner des informations détaillées pour une vitesse de brasseur adaptée pour réaliser les essais de conformité d'un produit particulier. Si les comités de produits ne peuvent pas fournir cette information, des essais de conformité doivent être réalisés en utilisant la technique du mode pas à pas.



### C.3 Autres considérations relatives au brassage continu

#### C.3.1 Temps de réponse/durée de cycle du matériel en essai

Plus le temps de réponse et/ou la durée de cycle du matériel en essai sont rapides, plus le matériel est adapté au brassage continu [3]. Ceci constitue l'une des raisons pour lesquelles les méthodes par brassage de modes continu sont préférées pour la réalisation des essais d'efficacité d'écran. Les récepteurs utilisés pour les essais d'efficacité d'écran sont généralement très rapides. Pour les essais d'immunité, le temps nécessaire au matériel en essai pour répondre au champ appliqué et à tout mauvais fonctionnement ou toute anomalie à détecter, doivent être pris en compte. Pour les essais d'émission, il doit être tenu compte de la durée de cycle du dispositif et du temps de réponse de l'équipement de contrôle.

Pour des écrans très élevés, les récepteurs sont souvent réglés sur une largeur de bande de résolution plus étroite afin d'accroître la dynamique de mesurage. Ceci peut réduire le temps de réponse et la vitesse d'échantillonnage du récepteur. L'essai effectué doit tenir compte de ces changements.

#### C.3.2 Vitesse de rotation du brasseur

La vitesse de rotation du brasseur doit être établie avant de commencer l'essai. La vitesse de changement du champ détermine la vitesse de rotation du brasseur. Pour les essais d'immunité, la vitesse est déterminée par le temps nécessaire au matériel en essai pour répondre au champ appliqué et pour détecter tout mauvais fonctionnement ou toute anomalie. Pour les essais d'émissions, la vitesse est déterminée par la durée du cycle du dispositif et par le temps de réponse de l'équipement de contrôle. Les Figures C.1 et C.2, montrent les champs à l'intérieur d'une chambre réverbérante à deux fréquences, lorsqu'un brasseur unique a subi des rotations à une vitesse fixe d'environ 5,2 s par rotation. La vitesse de variation du champ à l'intérieur d'une chambre réverbérante dépend de la fréquence. A des fréquences plus élevées, la vitesse de changement peut être très rapide pour une vitesse de rotation modérée, étant donné la disponibilité d'un plus grand nombre d'échantillons indépendants. La vitesse de changement du champ pour une chambre particulière doit être évaluée sur la gamme de fréquences considérée. La vitesse de rotation du brasseur peut être réglée en fonction de la vitesse de rotation la plus faible qui donne la vitesse de changement maximale admise dans le champ. La vitesse de rotation du brasseur peut être également réglée sur la gamme de fréquences devant être soumise à essai. Il convient que l'évaluation du brasseur soit réalisée à des intervalles qui ne doivent pas dépasser 100 MHz à des fréquences inférieures à 1 GHz et 1 000 MHz à des fréquences supérieures à 1 GHz.

#### C.3.3 Effet du brasseur sur le champ $E$ attendu

Comme cela est décrit à l'Annexe A (voir Figure A.10), la valeur attendue du champ  $E$  maximal est déterminée par le nombre d'échantillons indépendants (c'est-à-dire pas de brasseur)  $N$  pouvant être produits avec une rotation. La validation réalisée à l'Annexe B utilise le nombre de pas de brasseur qui a montré qu'il fournissait des incertitudes inférieures à la valeur acceptable maximale pour la chambre. En brassage de modes continu, il est vraisemblable d'obtenir un nombre d'échantillons inférieur à celui utilisé au cours de la validation en mode pas à pas. Si un nombre d'échantillons plus grand est obtenu, alors l'effet sur les essais d'immunité reviendrait à réaliser les essais à un niveau supérieur à celui requis. Si un nombre d'échantillons plus grand est obtenu au cours d'un essai d'émission pour des mesures fondées sur la puissance maximale, il en résulterait alors la mesure d'un niveau de puissance rayonnée en provenance du matériel en essai plus élevé que celui qui est réellement émis. Pour les mesures fondées sur la puissance moyenne, le brassage de modes continu serait plus précis en raison du nombre accru d'échantillons. Il est souhaitable que le nombre d'échantillons obtenu au cours de l'essai soit le même que le nombre d'échantillons obtenu au cours de la validation. Si le nombre d'échantillons n'est pas le même, alors il est souhaitable que ce nombre soit aussi élevé que possible, à la fois pour la validation et l'essai, dans la mesure où, à des valeurs élevées (c'est-à-dire supérieures à 100), les variations dans le champ  $E$  attendu sont moins prononcées.



NOTE Comme cela est représenté à l'Annexe A, le brasseur n'est pas capable de fournir un nombre infini d'échantillons. Le nombre maximal d'échantillons ( $n$ ) qui participent à la valeur attendue du champ  $E$  est limité au nombre d'échantillons indépendants que le brasseur est capable de fournir. Ce nombre baisse rapidement lorsque la fréquence d'essai approche de la fréquence utilisable la plus faible d'une chambre donnée.

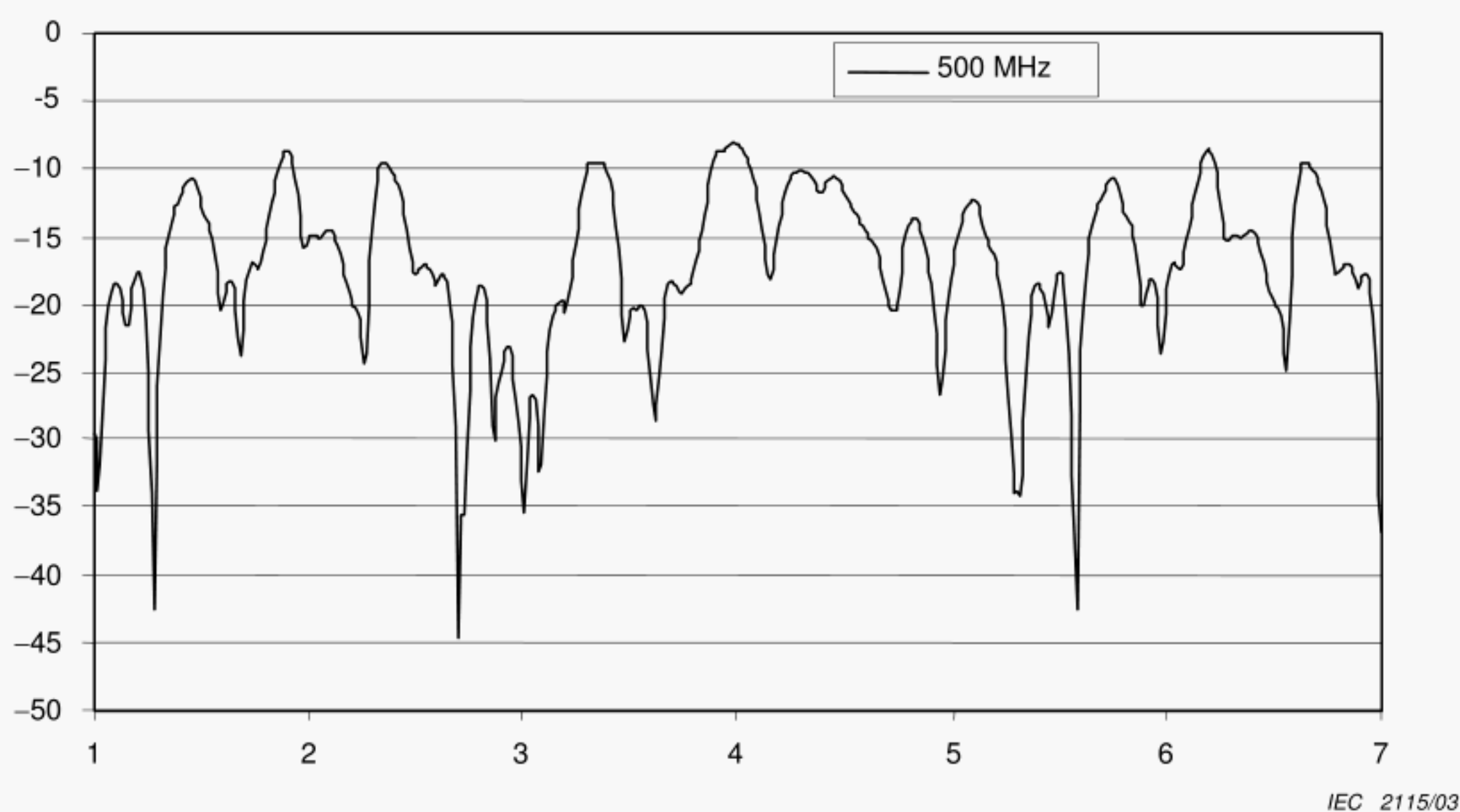
#### C.4 Questions à examiner en cas d'utilisation du brassage de modes continu

Les questions suivantes doivent être examinées lorsque le brassage continu est utilisé:

- a) temps de réponse/durée du cycle du matériel en essai;
- b) vitesse de rotation du brasseur (c'est-à-dire vitesse de changement du champ);
- c) effet du brassage sur la précision de la validation;
- d) en raison des diverses interactions entre la taille du brasseur et de la chambre, la vitesse de rotation et la vitesse de changement du champ, toute sensibilité associée à ladite vitesse peut ne pas être reproductible dans les chambres présentant des caractéristiques relativement différentes.

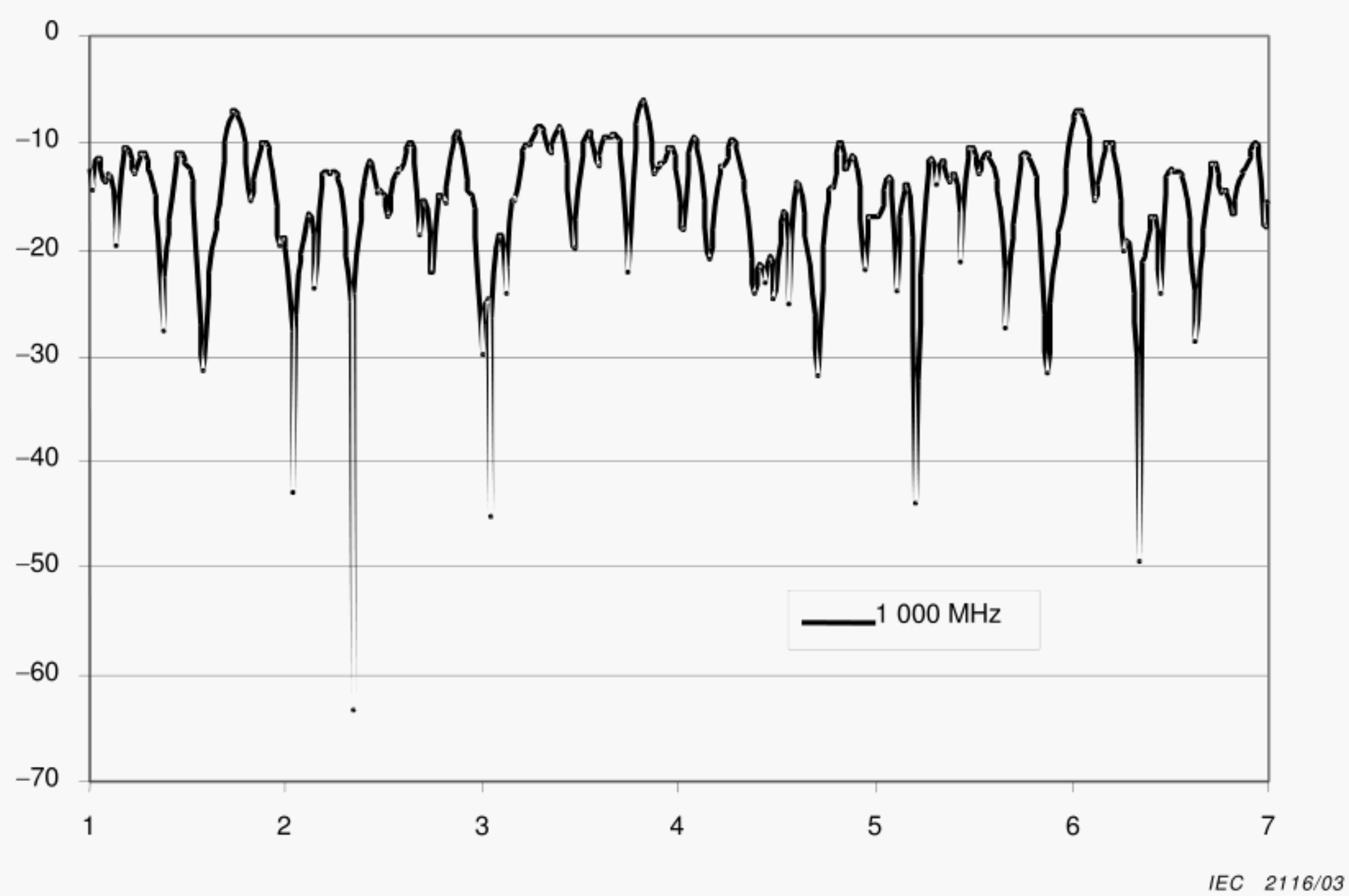
#### C.5 Documents de référence

- [1] ARNAUT, LR. Effect of local stir and spatial averaging on the measurement and testing in mode-tuned and mode-stirred reverberation chambers. IEEE Trans. EMC, Aug. 2001, vol. 43, nr. 3, p. 305-325.
- [2] ARNAUT, LR. On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, Nov. 2005, vol. 47 no. 4, pp. 781-804.
- [3] ARNAUT, LR. Nonstationary effects in mode-stirred reverberation, Proc. 15th Zürich Int. Symp. Techn. Exhib. EMC (18-20 Feb. 2003, Zürich, Switzerland), pp. 245-250.



**Figure C.1 – Puissance reçue (dBm) en fonction de la ou des rotation(s) du brasseur à 500 MHz**





**Figure C.2 – Puissance reçue (dBm) en fonction de la ou des rotations du brasseur à 1 000 MHz**



## Annexe D (normative)

### Essais d'immunité aux émissions rayonnées

#### D.1 Montage d'essai

Il convient que le montage d'essai type soit celui représenté à la Figure D.1. Il convient que le montage du matériel soit représentatif de l'installation réelle. Le matériel en essai doit être au moins à  $\lambda/4$  des parois de la chambre à la fréquence utilisable la plus faible de la chambre. Les matériels en essai conçus pour fonctionner sur table doivent être situés à  $\lambda/4$  du plancher de la chambre. Les matériels en essai destinés à reposer sur le sol doivent être placés sur un support à 10 cm du plancher, dans une zone située sous le volume uniforme, en utilisant un support diélectrique à faible perte. L'installation du matériel et des câbles d'essai doit être décrit dans le rapport d'essai, afin de faciliter la clarification ou l'explication de résultats d'essai uniques ou anormaux.

Il convient que la chambre ne comporte aucun matériau absorbant non nécessaire. Les éléments tels que tables en bois, moquettes, revêtements de mur et de plancher ou dalles de plafond ne doivent pas être utilisés. Les équipements lumineux exposés sont également une source de charge potentielle. Pour les nouvelles chambres, il est recommandé de réaliser une évaluation de la chambre avant l'installation de tout équipement de support autre que les portes, les orifices et les panneaux d'accès. Il convient que les équipements de support tels que les tables, etc. ne soient pas métalliques et soient faiblement absorbants. Le matériel en essai et tous les équipements de support ne doivent pas occuper plus de 8 % du volume total de la chambre.

Il convient que l'antenne d'émission se situe au même emplacement que celui utilisé pour la validation. L'antenne d'émission ne doit pas illuminer directement le matériel en essai ou l'antenne de réception. Une configuration recommandée consiste à diriger les antennes vers les coins de la chambre. Les modes de fonctionnement appropriés, les installations logicielles, la stabilité du matériel en essai, le matériel d'essai, et tous les circuits et charges de contrôle doivent être établis.

#### D.2 Validation

Avant de collecter les données, une vérification doit être effectuée pour déterminer si le matériel en essai et/ou son équipement de support ont chargé la chambre de manière défavorable. Cette vérification doit être effectuée comme indiqué à l'Article B.2. Si des procédures en mode continu sont utilisées, on doit veiller à s'assurer que les questions liées au brassage continu indiquées à l'Annexe C sont traitées de manière appropriée.

#### D.3 Procédures d'essai de l'immunité aux émissions rayonnées

##### D.3.1 Avertissement

**ATTENTION:** Les champs radioélectriques peuvent être dangereux. Observer les limites nationales applicables concernant l'exposition aux champs radioélectriques.

##### D.3.2 Détermination des exigences de puissance d'entrée de la chambre

Déterminer la puissance d'entrée de la chambre,  $P_{\text{Entrée}}$  (W), nécessaire pour satisfaire aux exigences d'essai pour l'intensité de champ électrique en utilisant l'équation:



$$P_{\text{Entrée}} = \left[ \frac{E_{\text{Test}}}{\left\langle \vec{E} \right\rangle_{24 \text{ ou } 9} \times \sqrt{CLF(f)}} \right]^2 \quad (\text{D.1})$$

où

$P_{\text{Entrée}}$  est la puissance incidente, en W, pénétrant dans la chambre pour obtenir le champ désiré pour les essais d'immunité,

$E_{\text{Test}}$  est le champ nécessaire en V/m,

$CLF(f)$  est le facteur de charge de chambre en fonction de la fréquence issue de l'Annexe B (B.2(7)),

$\left\langle \vec{E} \right\rangle_{24 \text{ ou } 9}$  est la moyenne du champ normalisé  $E$  (en V/m)/ $W^{0,5}$ ) provenant de la validation de la chambre vide (voir B.1.2 (10)(b) ou (c)). Il est nécessaire d'interpoler (interpolation linéaire) entre les points de fréquence de validation ; la validation à un intervalle de pas plus fin constitue également une option.

### D.3.3 Choix du balayage en fréquence, des vitesses de pas et des intervalles

#### D.3.3.1 Généralités

Le balayage en fréquence ou les vitesses de pas doivent être choisis en tenant compte du temps de réponse du matériel en essai, des largeurs de bande de sensibilité du matériel en essai, et du temps de réponse du matériel d'essai utilisé pour le contrôle. La vitesse de balayage choisie doit être justifiée par ce critère et documentée dans le rapport d'essai.

Sauf spécification contraire dans le plan d'essai, les lignes directrices suivantes sont utilisées pour choisir les fréquences d'essai.

#### D.3.3.2 Essais aux fréquences discrètes

Pour un équipement d'essai qui génère des fréquences discrètes, le nombre minimal de fréquences d'essai doit être de 100 fréquences par décade. Les fréquences d'essai doivent être logarithmiquement espacées. Comme exemple (au-delà de 100 MHz), la formule qui suit peut être utilisée pour calculer ces fréquences en ordre croissant [4]:

$$f_{n+1} = f_n \times 10^{(1/(N-1))} \quad (\text{D.2})$$

où

$n$  est un entier,

$n = 1$  à  $N$  avec  $N \geq 100$ , et

$f_n$  est la  $n^{\text{e}}$  fréquence d'essai ( $f_1$  est la fréquence de départ et  $f_N$  est la fréquence de fin.)

Le temps de palier à chaque fréquence d'essai doit être au moins de 0,5 s, à l'exclusion du temps de réponse de l'équipement d'essai, et du temps nécessaire pour appliquer une rotation au brasseur (jusqu'à son arrêt complet) (voir l'Annexe C pour les précautions concernant le brassage continu). Par conséquent, la durée d'essai minimale pour une décade de fréquences ne doit jamais être inférieure à 50 s par position du brasseur. Un temps de palier complémentaire à chaque fréquence d'essai peut être nécessaire, pour permettre au matériel en essai d'être placé dans les modes de fonctionnement appropriés, et pour permettre une «période d'arrêt» au cours de la modulation en basse fréquence. Deux cycles complets au moins de modulation doivent être appliqués. Par exemple, si la modulation appliquée est une modulation d'onde carrée à 1 Hz, le temps de palier ne doit pas être inférieur à 2 s. Le temps de palier choisi doit être justifié à partir du temps de réponse du matériel en essai et de l'équipement d'essai, ainsi que de la modulation appliquée, et il doit être documenté dans le rapport d'essai.



### D.3.3.3 Essais par balayage en fréquence

L'excitation par balayage en fréquence peut contribuer au caractère non stationnaire du champ de la chambre [5, 6]. Par conséquent, des fréquences discrètes doivent être utilisées, sauf spécification d'une vitesse de balayage par le comité de produits. L'utilisation du brassage continu avec les essais par balayage en fréquence est déconseillée.

NOTE Il convient d'inclure des fréquences d'essai complémentaires pour des fréquences de réponse connues du matériel, comme les fréquences images (FI), les fréquences d'horloge, etc. Des exigences d'essai, de fabricant ou gouvernementales/réglementaires spécifiques peuvent donner une vitesse de balayage particulière ou un ou des intervalle(s) de fréquence prioritaire(s).

## D.4 Réalisation de l'essai

Dans la mesure où une chambre réverbérante, contrairement à la plupart des autres installations d'essai CEM, ne prend pas en charge les ondes planes à une position (angle) donnée du brasseur de modes, les conditions de propagation et d'excitation du matériel en essai sont différentes de celles dans un environnement en espace libre. Par conséquent, les niveaux d'essai préférables et leurs intervalles de confiance associés peuvent être sensiblement différents de ceux appliqués dans d'autres installations d'essai. La densité de puissance maximale ou moyenne, par opposition à l'intensité du champ, constitue la grandeur préférable compte tenu de la nature physico-statistique des champs à l'intérieur d'une chambre réverbérante.

Réaliser les essais en utilisant les procédures en mode pas à pas ou en mode continu. Pour le fonctionnement en mode pas à pas, utiliser les nombres minimaux de pas comme indiqué par la validation de la chambre. Il convient que le brasseur subisse une rotation selon des pas à espacement égal de manière à obtenir une révolution complète à chaque fréquence. Si des procédures par mode continu sont utilisées, on doit s'assurer que le matériel en essai est exposé au moins au nombre d'échantillons auquel l'équipement de validation était exposé au cours de la validation. S'assurer que, pour toute procédure, le matériel en essai est exposé au niveau de champ pour le temps de palier approprié. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement en mode continu.

NOTE 1 La validation de la chambre permet de réduire le nombre de pas à 12 si les données indiquent qu'une performance de chambre acceptable peut être atteinte.

Contrôler et enregistrer  $P_{\text{MaxRec}}$  et  $P_{\text{MoyRec}}$  avec l'antenne de réception utilisée pour la validation de chaque bande de fréquences, afin de s'assurer que le champ exigé est généré. Utiliser  $P_{\text{MoyRec}}$  pour s'assurer que la charge de la chambre n'a pas changé par rapport à la validation indiquée à l'Article D.2. Les différences supérieures à 3 dB entre la  $P_{\text{MoyRec}}$  et celle obtenue à l'Article D.2 doivent être réduites. La  $P_{\text{MaxRec}}$  peut également être utilisée pour estimer la valeur de crête du champ  $E$  généré comme indiqué à l'Annexe A.

Contrôler et enregistrer les valeurs moyennes de  $P_{\text{Entrée}}$  et  $P_{\text{Réfléchi}}$ . Il convient de noter dans le rapport d'essai les variations de  $P_{\text{Entrée}}$  supérieures à 3 dB sur une rotation du brasseur.

Moduler la porteuse comme spécifié dans le plan d'essai. Lorsque la modulation est appliquée, s'assurer que l'amplitude de crête satisfait aux définitions du plan d'essai.

Balayer la gamme de fréquences jusqu'à la limite supérieure de fréquence en utilisant les antennes et modulations appropriées.

NOTE 2 Lorsqu'on utilise une modulation par impulsions, s'assurer que les exigences de l'Article B.3 sont satisfaites.

NOTE 3 L'interpolation linéaire entre les points de validation est nécessaire.



## D.5 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit comporter la disposition des câbles et le positionnement du matériel en essai par rapport aux câbles, ainsi qu'un schéma du montage d'essai et/ou des photographies.

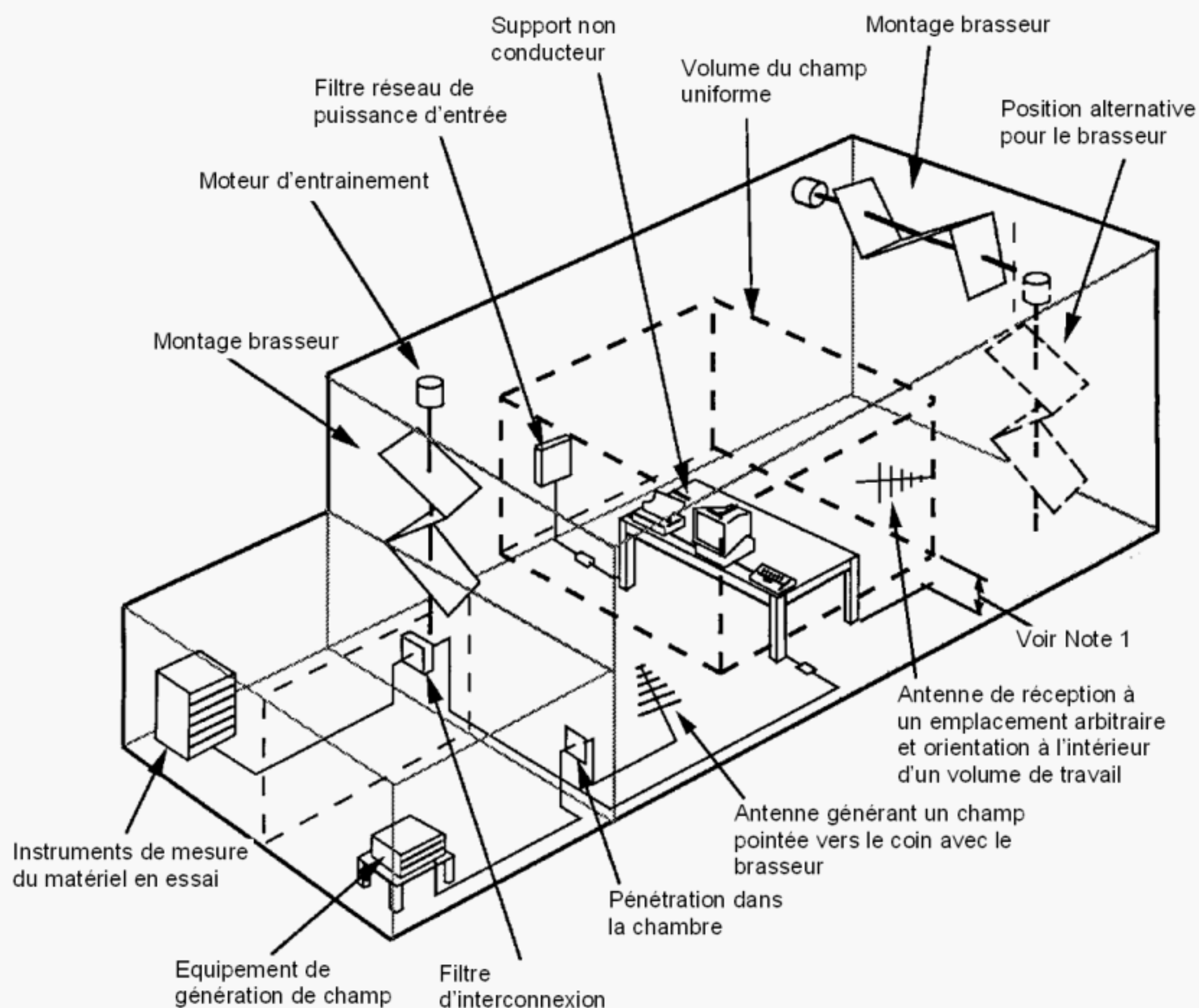
Le rapport d'essai doit par ailleurs comporter les paramètres suivants pour chaque fréquence d'essai, en plus des exigences relatives au rapport concernant le matériel en essai:

- a) puissance maximale reçue de l'antenne de réception utilisée pour contrôler le champ dans la chambre;
- b) puissance moyenne reçue de l'antenne de réception utilisée pour contrôler le champ dans la chambre;
- c) puissance incidente délivrée à l'antenne d'émission de la chambre;
- d) puissance réfléchie provenant de l'antenne d'émission de la chambre;
- e) variations de la puissance incidente au cours de la période de collecte de données supérieures 3 dB;
- f) différences supérieures à 3 dB entre les niveaux de champ basés sur la puissance d'entrée de la chambre et ceux calculés en utilisant les méthodes de A.5.4 qui n'ont pas pu être résolues.

## D.6 Documents de référence

- [1] KOEPKE, G. and HILL, D. Test device directivity for EMC measurements. *2000 IEEE Symposium on EMC*, Washington, DC, 23 August 2000, p. 535-539.
- [2] FREYER, GJ. and BÄCKSTRÖM, M. Comparison of anechoic & reverberation chamber transfer function data as a function of directivity magnitude and pattern. *2000 IEEE Symposium on EMC*, Washington, DC, 23 August 2000, p. 615-620.
- [3] FREYER, GJ. and BÄCKSTRÖM, M. Comparison of anechoic and reverberation chamber coupling data as a function of directivity pattern – Part II. *2001 IEEE Symposium on EMC*, Montreal, Canada, August 2001, p. 286-291.
- [4] 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*
- [5] ARNAUT, LR. On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation. *IEEE Trans. EMC*, vol. 47 no. 4, pp. 781-804, Nov. 2005.
- [6] ARNAUT, LR. Maximum rates of frequency scanning and mechanical or electronic stirring for distortionless signal generation inside electromagnetic reverberation chambers. *Proceedings 2008 EMC Europe Symposium*, Hamburg, Germany, 8-12 Sep. 2008.





IEC 093/11

NOTE 1 Il convient que le volume d'essai soit à la fréquence utilisable la plus faible, à au moins  $\lambda/4$  de la surface de la chambre, de l'antenne de génération de champ ou du montage brasseur. (Voir Note 5 de la Figure B.1).

NOTE 2 Un support non conducteur/non absorbant peut être utilisé si le matériel en essai n'exige pas un plan de sol pour un fonctionnement correct.

NOTE 3 La mousse en polystyrène constitue un support adapté dans la plupart des cas.

**ATTENTION:** Les matériaux en mousse peuvent présenter un risque de feu si le matériel en essai produit une chaleur suffisante et/ou dans le cas d'essais aux champs qui peuvent induire des arcs.

**Figure D.1 – Exemple d'installation d'essai adaptée**



## **Annexe E** (normative)

### **Mesures des émissions rayonnées**

#### **E.1 Vue d'ensemble**

La présente annexe traite de l'utilisation des chambres réverbérantes pour réaliser les mesures de puissance rayonnée en émissions [1]<sup>6</sup> (à la fois intentionnelle et/ou non intentionnelle). Cette annexe ne couvre pas toutes les nuances des mesures d'émissions. Les informations sur les appareils de mesure peuvent être trouvées dans la CISPR 16-1-1. En général, les informations données dans la CISPR 16-1-1 s'appliquent sans modification lorsqu'on fait des mesures en utilisant une chambre réverbérante.

Il existe deux exceptions qui exigent une prise en compte complémentaire:

- a) la distorsion des impulsions de courte durée (normalement définies comme inférieures à 10  $\mu$ s) par le facteur de qualité de chambre ou «Q», et
- b) la variation apparente d'amplitude du signal émis due au déplacement du dispositif de brassage mécanique.

Pour la détermination du facteur Q de chambre adapté (c'est-à-dire la constante de temps), on peut se référer à l'Article B.3. Il convient que les effets du brasseur soient pris en compte, lors du choix du temps de palier ou de la vitesse de rotation et lors du choix du type de détecteur à utiliser.

#### **E.2 Montage d'essai**

Les informations relatives au montage d'essai contenues dans la CISPR 16-2-3 s'appliquent aux essais en chambre réverbérante. Les seules exigences complémentaires sont les suivantes: le matériel en essai doit se situer à au moins  $\lambda/4$  des parois de la chambre, et les matériels en essai destinés à reposer sur le sol doivent être maintenus à 10 cm du sol par un support diélectrique à faible perte/faible permittivité. L'utilisation d'un plan de sol est admise si nécessaire pour le fonctionnement correct du matériel en essai. En outre, il n'est plus nécessaire de manipuler l'emplacement des câbles d'interface, et il convient que la table support soit non absorbante et non conductrice. Un montage d'essai type est représenté à la Figure E.1.

Il convient que l'antenne d'émission (utilisée au cours de la validation de la chambre pour vérifier la chambre en termes de charge) reste dans la chambre au même emplacement que celui utilisé pour la validation. L'antenne d'émission ne doit pas illuminer directement le matériel en essai ou l'antenne de réception. L'antenne de réception ne doit pas être directement illuminée par le matériel en essai (c'est-à-dire qu'il convient que l'antenne de réception ne soit pas dirigée vers le matériel en essai). Une configuration optimale consiste à diriger les antennes vers les coins de la chambre. Etablir l'installation de logiciel, les modes de fonctionnement et la stabilité du matériel en essai, l'équipement d'essai, et tous les circuits et charges de contrôle.

#### **E.3 Validation**

Avant de collecter les données, une vérification doit être effectuée pour déterminer si le matériel en essai et/ou son équipement de support ont chargé la chambre de manière

<sup>6</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article E.11. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



défavorable. Cette vérification doit être effectuée comme indiqué à l'Article B.2. Si des procédures en mode continu sont utilisées, on doit veiller à s'assurer que les questions liées au brassage indiquées à l'Annexe C sont traitées de manière appropriée. Une fois la vérification de charge effectuée, l'antenne d'émission doit être terminée par une impédance caractéristique équivalente à la source radioélectrique utilisée au cours de la validation.

#### E.4 Procédures d'essai pour les émissions rayonnées

NOTE Les champs radioélectriques peuvent être dangereux. Observer les limites nationales applicables concernant l'exposition aux champs radioélectriques.

Réaliser les essais en utilisant les procédures en mode pas à pas ou en mode continu. S'assurer pour toute procédure que le nombre d'échantillons du matériel en essai est au moins égal au nombre d'échantillons utilisés pour l'équipement de validation au cours de la validation. Pour le fonctionnement en mode pas à pas, utiliser le nombre minimal d'échantillons selon les indications fournies par la validation de la chambre. Il convient que le brasseur subisse une rotation selon des pas à espacement égal de manière à obtenir une révolution complète à chaque fréquence. Si des procédures en mode continu sont utilisées, on doit s'assurer que les émissions du matériel en essai sont échantillonnées avec au moins le nombre d'échantillons collectés au cours de la validation de la chambre. Comme pour les échantillons en mode pas à pas, il convient que les échantillons en mode continu soient espacés de manière uniforme sur une rotation complète du brasseur.

S'assurer pour l'une ou l'autre des procédures que le matériel en essai est contrôlé au niveau de chaque échantillon pour une durée suffisante pour détecter toutes les émissions (voir CISPR 16-2-3 pour les lignes directrices sur les temps de balayage des récepteurs). Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement en mode continu. Il convient que les procédures en mode continu ne soient appliquées qu'aux signaux non modulés en utilisant un détecteur de crête. Compte tenu de la variation d'amplitude du signal reçu causée par le déplacement du brasseur, la durée d'essai est normalement augmentée si un détecteur de crête doit être utilisé. Le brassage de mode n'est pas applicable lorsqu'on utilise un détecteur de valeur moyenne ou un autre détecteur de pondération.

Pour les émissions modulées (c'est-à-dire non sinusoïdales), la puissance moyenne rayonnée (c'est-à-dire moyennée sur la largeur de bande de résolution) dans la largeur de bande de mesure est mesurée, si un détecteur de valeur efficace est utilisé. Si le spectre d'émissions est plus large que la largeur de bande de mesure, la puissance rayonnée totale peut être mesurée en intégrant la densité spectrale de puissance sur le spectre d'émission associé à la modulation.

Contrôler et enregistrer  $P_{\text{MaxRec}}$  et/ou  $P_{\text{MoyRec}}$  comme spécifié dans le plan d'essai avec l'antenne de réception utilisée pour la validation de chaque bande de fréquence.

**ATTENTION:** Pour obtenir une mesure précise de  $P_{\text{MoyRec}}$ , le niveau du plancher de bruit de l'équipement de réception doit être au moins de 20 dB inférieur à  $P_{\text{MaxRec}}$ .

Balayer la gamme de fréquences jusqu'à la limite supérieure de fréquence en utilisant les antennes et les largeurs de bande appropriées. Il convient que le temps de balayage pour cette procédure soit tel que spécifié dans le plan d'essai.

#### E.5 Détermination de la puissance rayonnée

La mesure de la quantité de puissance reçue par l'antenne de réception et la correction des pertes de chambre peuvent être utilisées pour déterminer la quantité de puissance radioélectrique (dans la largeur de bande de mesure) rayonnée par un dispositif placé dans la chambre. Dans la présente norme, la puissance rayonnée est déterminée à partir d'une méthode de substitution [2] utilisant les données issues de la validation de la chambre,



augmentées d'un facteur de correction qui tient compte de la charge de la chambre par le matériel en essai d'émission.

La puissance rayonnée par un dispositif peut être déterminée en utilisant soit la puissance moyenne reçue soit la puissance maximale reçue, sous la forme

$$P_{\text{Rayonnée}} = \frac{P_{\text{MoyRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CVF} \quad (\text{E.1})$$

$$P_{\text{Rayonnée}} = \frac{P_{\text{MaxRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CLF \times IL} \quad (\text{E.2})$$

où

$P_{\text{Rayonnée}}$	est la puissance rayonnée provenant du dispositif (dans la largeur de bande de mesure),
$CVF$	est le facteur de validation de chambre (Article B.2 (6),
$CLF$	est le facteur de charge de chambre (Article B.2 (7)),
$IL$	est la perte d'insertion de la chambre (B.1.4),
$P_{\text{MoyRec}}$	est la puissance reçue (dans les limites de la largeur de bande de mesure) telle qu'elle est mesurée par l'antenne de référence moyennée sur le nombre de pas du brasseur (Article E.4),
$P_{\text{MaxRec}}$	est la puissance maximale reçue (dans les limites de la largeur de bande de mesure) sur le nombre de pas du brasseur (Article E.4), et
$\eta_{\text{Tx}}$	est le facteur d'efficacité de l'antenne d'émission utilisée pour l'étalonnage de la chambre, et on peut estimer (s'il n'est pas connu) qu'il est de 0,75 pour une antenne log périodique et de 0,9 pour une antenne cornet.

L'Equation (E.1) est utilisée pour les mesures fondées sur la puissance moyenne reçue et l'Equation (E.2) pour les mesures fondées sur la puissance maximale reçue. L'avantage à utiliser des mesures fondées sur la puissance moyenne est que l'incertitude est plus faible. L'inconvénient est que le système de mesure doit avoir une sensibilité de 20 dB inférieure à la valeur  $P_{\text{MaxRec}}$  mesurée pour obtenir une mesure moyenne précise.

NOTE D'autres méthodes de mesure des émissions ont été proposées afin de supprimer toute nécessité d'une validation préalable de la chambre, mais qui utilisent la mesure temporelle de la descente de l'impulsion avec le matériel en essai comme source [3]. Sous réserve de prévoir le fait que le facteur  $Q$  déterminé à partir de la mesure de la descente de l'impulsion (Equation (A.11) pour la valeur  $\tau$  mesurée) peut s'écarter de sa valeur obtenue à partir des mesures à ondes entretenues (Equation (A.10)), ces méthodes génèrent des résultats pour la puissance rayonnée totale estimée comparables à ceux obtenus avec l'Equation (E.1).

## E.6 Estimation du champ en espace libre (lointain) généré par un matériel en essai

Le champ généré par le matériel en essai à une distance de  $R$ , en m, peut être estimé en utilisant l'équation:

$$E_{\text{Rayonnée}} = \sqrt{\frac{D \times P_{\text{Rayonnée}} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \quad (\text{E.3})$$

où

$E_{\text{Rayonnée}}$	est le champ estimé, généré par le matériel en essai en V/m,
$P_{\text{Rayonnée}}$	est la puissance rayonnée provenant de l'Article E.5, en W,
$R$	est la distance, en m, par rapport au matériel en essai; cette distance doit par ailleurs être suffisante pour assurer que les conditions en champ lointain existent,



$\eta_0$  est l'impédance intrinsèque de l'espace libre, approximativement égale à 377  $\Omega$ ,  
et  
 $D$  est la directivité maximale (adimensionnelle) du matériel en essai.

NOTE Une directivité de  $D = 1,7$  est souvent utilisée dans la mesure où elle représente l'hypothèse selon laquelle le diagramme de rayonnement du matériel en essai est l'équivalent d'une antenne dipolaire dont la longueur est comprise entre une demi et une longueur d'onde complète. Il est recommandé d'utiliser un facteur de 1,7 sauf si le comité de produits peut fournir une valeur mieux appropriée. Les recherches récentes sur la directivité des appareils sont spécifiées en [4], [5].

Le champ de perturbation calculé n'est pas toujours compatible avec les résultats de mesure donnés aux emplacements d'essai en espace libre ou à des emplacements d'essai similaires. Cette compatibilité si elle est nécessaire doit être mise en évidence par les procédures spécifiques aux types de matériels en essai ou aux groupes de produits.

## E.7 Estimation du champ en demi-espace (lointain) généré par un matériel en essai

Le champ généré par le matériel en essai à une distance de  $R$ , en m, et à une hauteur  $h$  au-dessus d'un plan de sol conducteur parfait, peut être estimé en utilisant l'équation:

$$E_{\text{Rayonnée}} = g_{\text{max}} \sqrt{\frac{D \times P_{\text{Rayonnée}} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \quad (\text{E.4})$$

où les symboles ont la même signification que dans l'Equation (E.3), et où

$g_{\text{max}}$  est le facteur de géométrie adimensionnel tenant compte des réflexions du plan de sol.

Le facteur de géométrie prend en compte le balayage de hauteur généralement effectué dans des conditions de demi-espace et est donné par l'équation suivante:

$$g_{\text{max}} = \begin{cases} \left| \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} - \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\text{max}} & \text{pour une polarisation horizontale} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\text{max}} & \text{pour une polarisation verticale} \end{cases} \quad (\text{E.5})$$

où

$r = \sqrt{s^2 + R_h^2}$  est la distance de l'antenne à la projection perpendiculaire de l'EUT (en mètres),

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_h - h)^2}$  est la longueur du faisceau direct (en mètres),

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_h + h)^2}$  est la longueur du faisceau réfléchi (en mètres),

$s$  est la distance de mesure (en mètres),

$R_h$  est la hauteur de l'antenne (en mètres).

Le facteur de géométrie approprié est illustré à la Figure E.2. La valeur maximale est prise compte tenu du balayage de hauteur de l'antenne de réception (paramètre  $R_h$ ). Pour une mesure type effectuée sur un emplacement d'essai en espace libre ( $s = 10$  m,  $h = 1$  m, balayage de hauteur compris entre 1 m et 4 m),  $g_{\text{max}}$  est approximativement égal à 2 pour les fréquences supérieures à 200 MHz, tant pour la polarisation horizontale que verticale. Des procédures de conversion, pour les émissions de puissance rayonnée estimée à partir de



mesures avec des sondes de champ  $E$  et en référence aux mesures sur emplacement champ d'essai en espace libre, ont été démontrées en [6] et [7], respectivement.

## E.8 Directivité maximale

Pour un dipôle électrique ou magnétique court en comparaison avec la longueur d'onde, la directivité maximale est égale à 1,5. Pour la combinaison d'un dipôle magnétique et électrique, la directivité maximale est égale à 3. Pour un matériel en essai électriquement grand, l'hypothèse d'un rayonnement de type dipôle n'est généralement pas suffisamment précise, générant une directivité maximale plus grande. Sous réserve que le rayonnement du matériel en essai soit suffisamment omnidirectionnel, à l'exception de la présentation de faisceaux isolés étroits dans certaines directions, la directivité maximale attendue  $D$  pour une antenne non intentionnelle peut être calculée de manière approchée sur la base du rayon  $a$  de la sphère environnante la plus petite:

$$D = \begin{cases} 1,55 & \text{pour } ka \leq 1 \\ 0,5 \left( 0,577 + \ln(4(ka)^2 + 8ka) + \frac{1}{8(ka)^2 + 16ka} \right) & \text{pour } ka > 1 \end{cases} \quad (\text{E.6})$$

Il est recommandé d'utiliser la valeur maximale  $D = 3$  pour la ration dipolaire ou  $D$  selon l'Equation (E.6) sauf si le comité de produits peut fournir une valeur mieux appropriée.

## E.9 Incertitude de mesure

Pour l'estimation de l'incertitude de mesure associée aux émissions rayonnées, voir l'Annexe K et [7]. En général, l'incertitude dépend de la désadaptation d'impédance du matériel en essai et de l'antenne de réception, ainsi que de la perte d'insertion de la chambre vide.

## E.10 Rapport d'essai

Il convient que le rapport d'essai comporte les paramètres suivants pour chaque fréquence d'essai, en plus des exigences relatives au rapport concernant le matériel en essai:

- a) puissance maximale reçue de l'antenne de réception si enregistrée;
- b) puissance moyenne reçue de l'antenne de réception si enregistrée;
- c) puissance émise par le matériel en essai comme cela est défini à l'Article E.5;
- d) si le champ  $E$  estimé doit être consigné, alors la directivité posée par hypothèse et utilisée pour calculer le champ  $E$  (voir Equation (E.3)) doit également être consignée;
- e) données de charge comme exigées par l'Equation (E.3);
- f) disposition des câbles et positionnement du matériel en essai par rapport aux câbles;
- g) schéma du montage d'essai (par exemple, photographies).

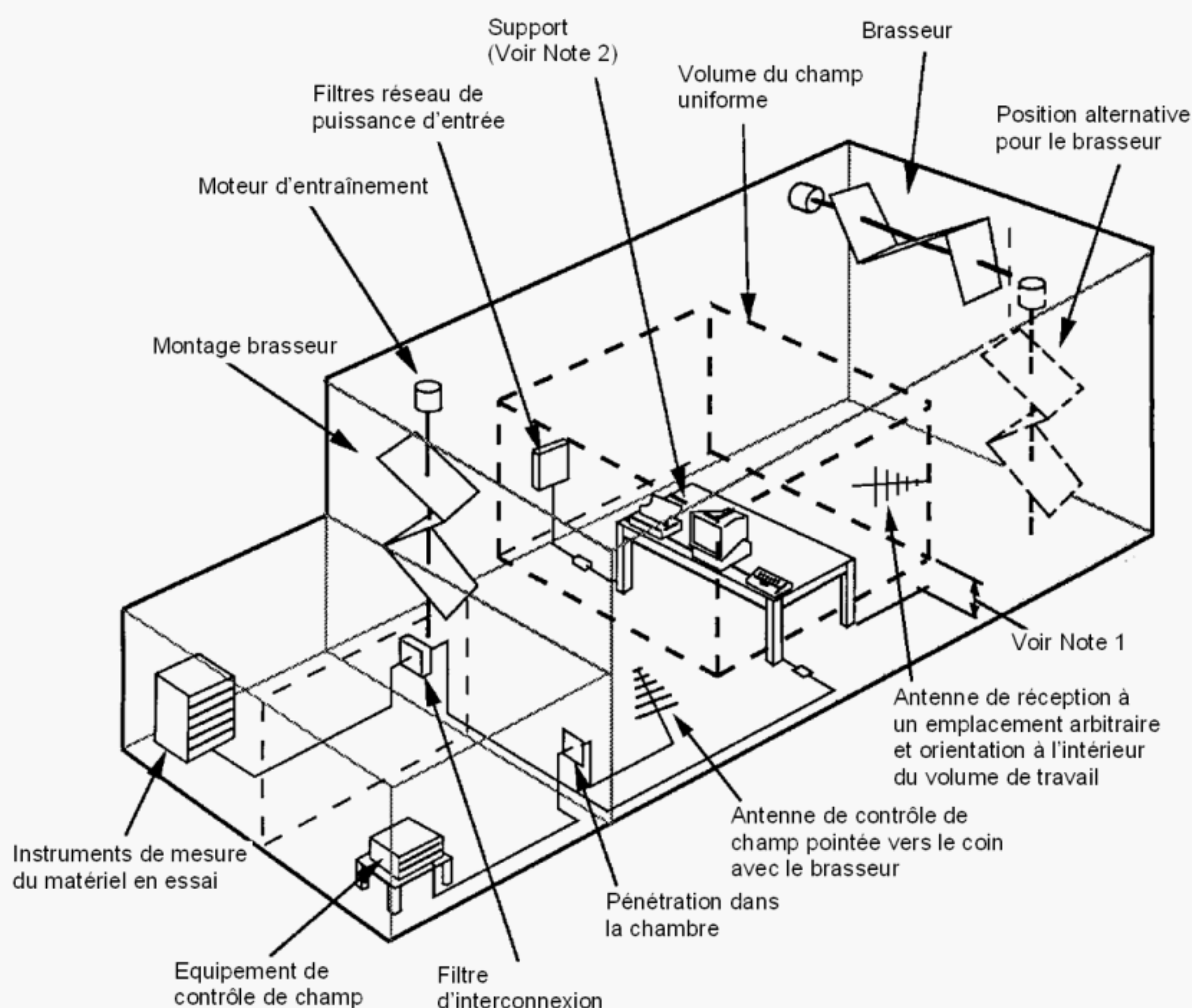
## E.11 Documents de référence

- [1] HARRINGTON, TE. Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells. In *Proceedings of the 2000 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, 22 August 2000, p. 23-28.
- [2] CORONA, P., LATMIRAL, G., PAOLINI, E., and PICCIOLI, L. Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, *IEEE Trans. EMC.*, vol. 18 no. 2, May 1976, pp. 54–59, Comments and corrections, *IEEE Trans. EMC*, vol. 18 no. 4, Nov. 1976, p. 205.



- [3] KRAUTHÄUSER, HG. On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers *IEEE Trans. EMC*, vol. 49 no. 2, pp. 270-279, May 2007.
- [4] BÄCKSTRÖM, M., LORÉN, J., ERIKSSON, G. and ÅSANDER, H-J. Microwave Coupling into a Generic Object. Properties of Measured angular Receiving Pattern and its Significance for Testing. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, Canada, August 13-17, 2001, p. 1227-1232.
- [5] WILSON, P., KOEPKE, G., LADBURY, J. and HOLLOWAY CL. Emission and Immunity standards: Replacing Field-at-a-Distance Measurements with Total-Radiated Power Measurements. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, Canada, August 13-17, 2001, p. 964-969.
- [6] GARBE, H. and BATTERMAN, S., Converting total-radiated-power measurements to equivalent E-field data, In *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Detroit, MI, August 18-22, 2008.
- [7] ARNAUT, LR. Measurement uncertainty in reverberation chambers – I. Sample statistics, Report TQE 2, Ed. 2.0, National Physical Laboratory, Teddington, U.K., Dec. 2008. [[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/TQE2.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf)]





IEC 094/11

NOTE 1 Il convient que le volume d'essai soit à la fréquence utilisable la plus faible, à au moins  $\lambda/4$  de la surface de la chambre, de l'antenne de génération de champ ou du montage brasseur. (Voir Note 5 de la Figure B.1.)

NOTE 2 Il convient d'utiliser un support non conducteur/non absorbant si le matériel en essai n'exige pas un plan de sol pour un fonctionnement correct.

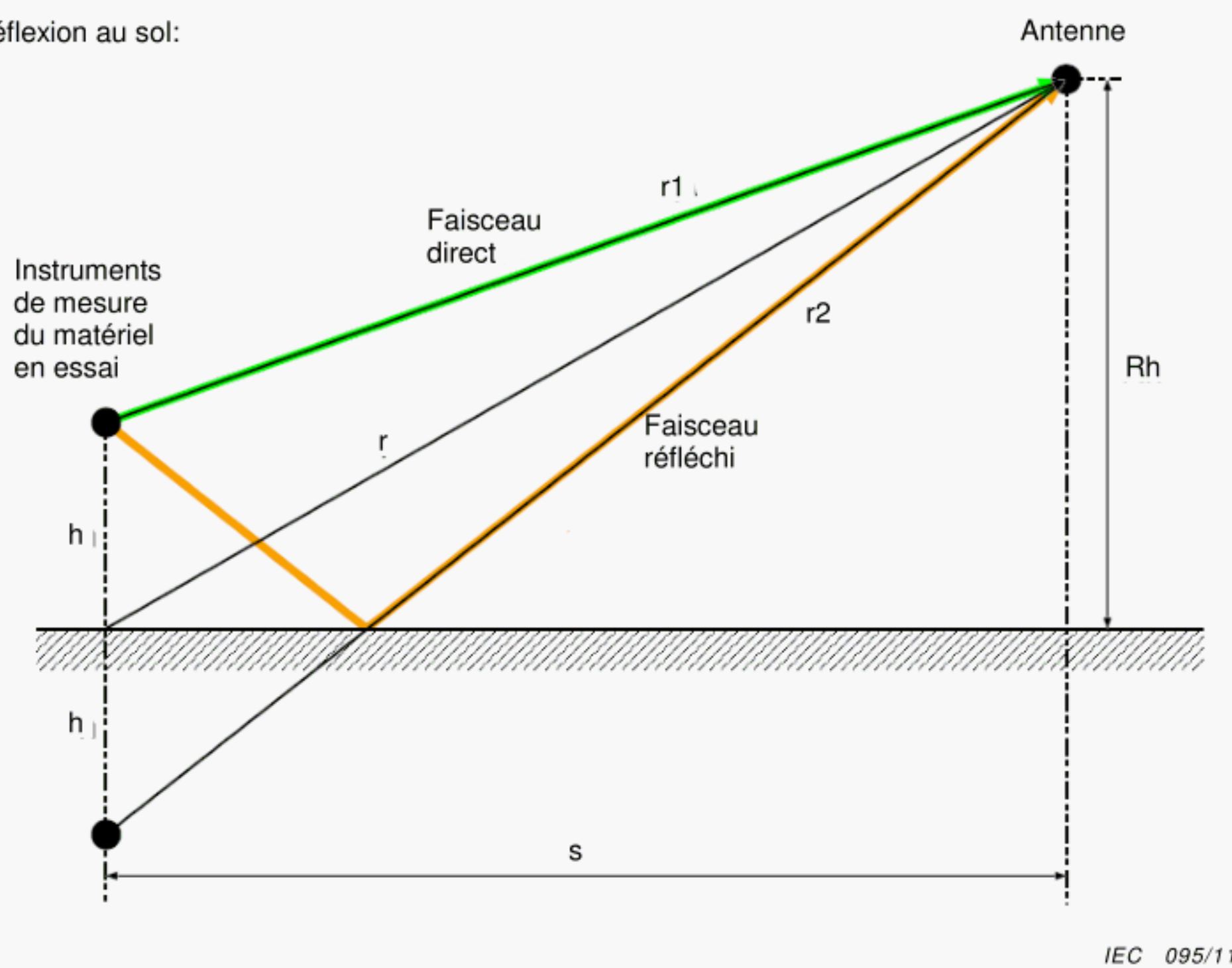
NOTE 3 La mousse en polystyrène constitue un support adapté dans la plupart des cas. Les matériaux en mousse peuvent présenter un danger d'incendie si le matériel en essai produit une chaleur suffisante.

NOTE 4 Il convient que la chambre ne comporte aucun matériau absorbant non nécessaire. Il convient de ne pas utiliser d'articles tels que tables en bois, moquettes, revêtements de mur et de plancher ou dalles de plafond. Les équipements lumineux exposés sont également une source de charge potentielle. Pour les nouvelles chambres, il est recommandé de réaliser une évaluation de la chambre avant l'installation de tout équipement de support autre que les portes, les orifices et les panneaux d'accès. Il convient que les équipements de support tels que les tables, etc., ne soient ni métalliques ni absorbants.

**Figure E.1 – Exemple d'installation d'essai adaptée**



Réflexion au sol:



**Figure E.2 – Relation avec le calcul du facteur géométrique pour les émissions rayonnées**



## Annexe F (informative)

### Mesures d'efficacité d'écran des assemblages de câbles, des câbles, des connecteurs, des guides d'ondes et des composants passifs hyperfréquence

#### F.1 Mesure de l'efficacité de blindage des matériels en essai

Comme pour les essais d'immunité aux perturbations rayonnées, il existe de nombreuses techniques d'essai disponibles pour évaluer les performances de blindage des joints d'étanchéité, des matériaux de fenêtre et d'autres configurations de systèmes conçus pour fournir un blindage [1]<sup>7</sup>, [2], [3]. Dans la présente annexe, la mesure de l'efficacité de blindage est fondée sur la comparaison de la puissance électromagnétique à l'extérieur du matériel en essai, avec la puissance électromagnétique induite dans le matériel en essai. L'efficacité de blindage est définie comme suit:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{F.1})$$

où

$P_{\text{EUT}}$  est la puissance couplée au matériel en essai en W, et

$P_{\text{Ref}}$  est la puissance couplée à l'antenne de référence en W.

#### F.2 Description du montage d'essai

##### F.2.1 Chambre réverbérante

L'enceinte blindée doit être modifiée avec au moins un accès supplémentaire pour permettre la connexion du matériel en essai. Certains matériels en essai peuvent nécessiter des accès multiples.

##### F.2.2 Antennes

Les antennes d'émission et de référence sont les mêmes que celles utilisées au cours de la validation de la chambre.

##### F.2.3 Montage d'essai

Les équipements et les composants d'essai généralement utilisés pour une mesure de l'efficacité de blindage automatisée sont représentés à la Figure F.1. Noter que des préamplificateurs, des amplificateurs et d'autres composants peuvent également être requis afin d'obtenir la dynamique désirée.

##### F.2.4 Matériel en essai (EUT)

Le matériel en essai est connecté à l'équipement de mesure par une longueur appropriée de support de transmission (c'est-à-dire coaxial, guide d'ondes, etc.). Pour s'assurer que le matériel en essai se situe dans le volume de champ uniforme, il convient que cette connexion ait une longueur d'au moins 1/3 de la longueur d'onde à la fréquence d'essai la plus faible. Il convient que l'accès en essai du matériel soit connecté à l'équipement de mesure. Il

<sup>7</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article F.5. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



convient que tout accès se termine par des charges adaptées ayant une efficacité de blindage supérieure d'au moins 5 dB à celle du matériel en essai (ou d'au moins 10 dB supérieure à l'écran désiré).

### **F.2.5 Dispositifs de liaison**

Les dispositifs de liaison sont généralement des lignes coaxiales à 50  $\Omega$  avec une efficacité de blindage supérieure d'au moins 10 dB au matériel en essai (ou au moins supérieure de 10 dB à l'écran désiré).

Tous les dispositifs de liaison doivent être caractérisés en atténuation avant le début de l'essai. Ceci inclut les dispositifs de liaison à la fois pour l'antenne du matériel en essai et l'antenne de référence. Voir la Figure F.1.

## **F.3 Procédure de mesure**

### **F.3.1 Généralités**

Réaliser les essais en utilisant les procédures du mode pas à pas ou du mode continu. Pour le fonctionnement en mode pas à pas, utiliser au moins le nombre de pas appliqués au cours de la validation de la chambre. Ceci est destiné à s'assurer que l'incertitude de mesure est la même ou est meilleure que celle obtenue au cours de la validation de la chambre. Il convient que le brasseur subisse une rotation selon des pas à espacement égal de manière à obtenir une révolution complète à chaque fréquence. Pour le fonctionnement en mode continu, la vitesse maximale de rotation du brasseur doit assurer que le matériel en essai (c'est-à-dire le récepteur de contrôle) est exposé à un nombre d'échantillons au moins égal à celui auquel l'équipement de validation a été exposé au cours de la validation. S'assurer que pour toute procédure le matériel en essai est exposé au niveau de champ pendant le temps de palier approprié. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement en mode continu. Si des procédures en mode continu sont utilisées, on doit veiller à s'assurer que les questions liées au brassage indiquées à l'Annexe C sont traitées de manière appropriée.

NOTE Les mesures d'efficacité de blindage sont généralement bien adaptées à l'utilisation du brassage, sous réserve que le matériel en essai et l'équipement de contrôle aient un temps de réponse rapide, ce qui est généralement le cas pour des mesures de ce type.

Le paramètre mesuré peut être la puissance moyenne reçue ou la puissance maximale reçue. La puissance moyenne reçue donnera une mesure plus précise. Ceci exige cependant une sensibilité de mesure inférieure d'au moins 20 dB à la puissance maximale reçue pour collecter des données moyennes précises. Pour les mesures fondées sur la puissance maximale reçue, il convient que la dynamique du système de mesure soit supérieure d'au moins 10 dB à l'écran désiré.

### **F.3.2 Mesure du matériel en essai**

Le générateur radioélectrique est connecté à la chambre (par un amplificateur si nécessaire) et fournit une puissance d'entrée constante à la chambre à une fréquence fixe. On fait fonctionner le brasseur de la manière désirée.

L'équipement de mesure est connecté au matériel en essai. L'antenne de référence de la chambre est connectée à l'équipement de contrôle de cette dernière.

Après le nombre approprié d'échantillons ou une révolution du brasseur, le paramètre désiré (c'est-à-dire la puissance moyenne reçue ou la puissance maximale reçue) est enregistré pour chaque fréquence d'essai à la fois de l'antenne de référence et du matériel en essai.

L'efficacité de blindage peut ensuite être calculée en tenant compte de l'affaiblissement des liaisons à la fois pour le matériel en essai et pour l'antenne de référence.



NOTE Ne PAS mélanger les paramètres ! Comparer la puissance maximale reçue par l'antenne à la puissance maximale reçue par le matériel en essai, ou la puissance moyenne reçue par l'antenne à la puissance moyenne reçue par le matériel en essai.

### F.3.3 Méthode alternative de mesure du matériel en essai

Si deux ensembles d'équipement de mesure ne sont pas disponibles, alors l'équipement de mesure peut être connecté tour à tour au matériel en essai et à l'antenne de référence.

Si deux ensembles de liaison sont utilisés, l'efficacité de blindage doit être calculée en tenant compte de l'affaiblissement des liaisons à la fois pour le matériel en essai et pour l'antenne de référence.

Si un seul ensemble de dispositifs de liaison est utilisé, alors l'affaiblissement de la liaison peut être ignoré, et l'efficacité de l'écran est la différence entre les deux puissances reçues (de crête ou moyenne).

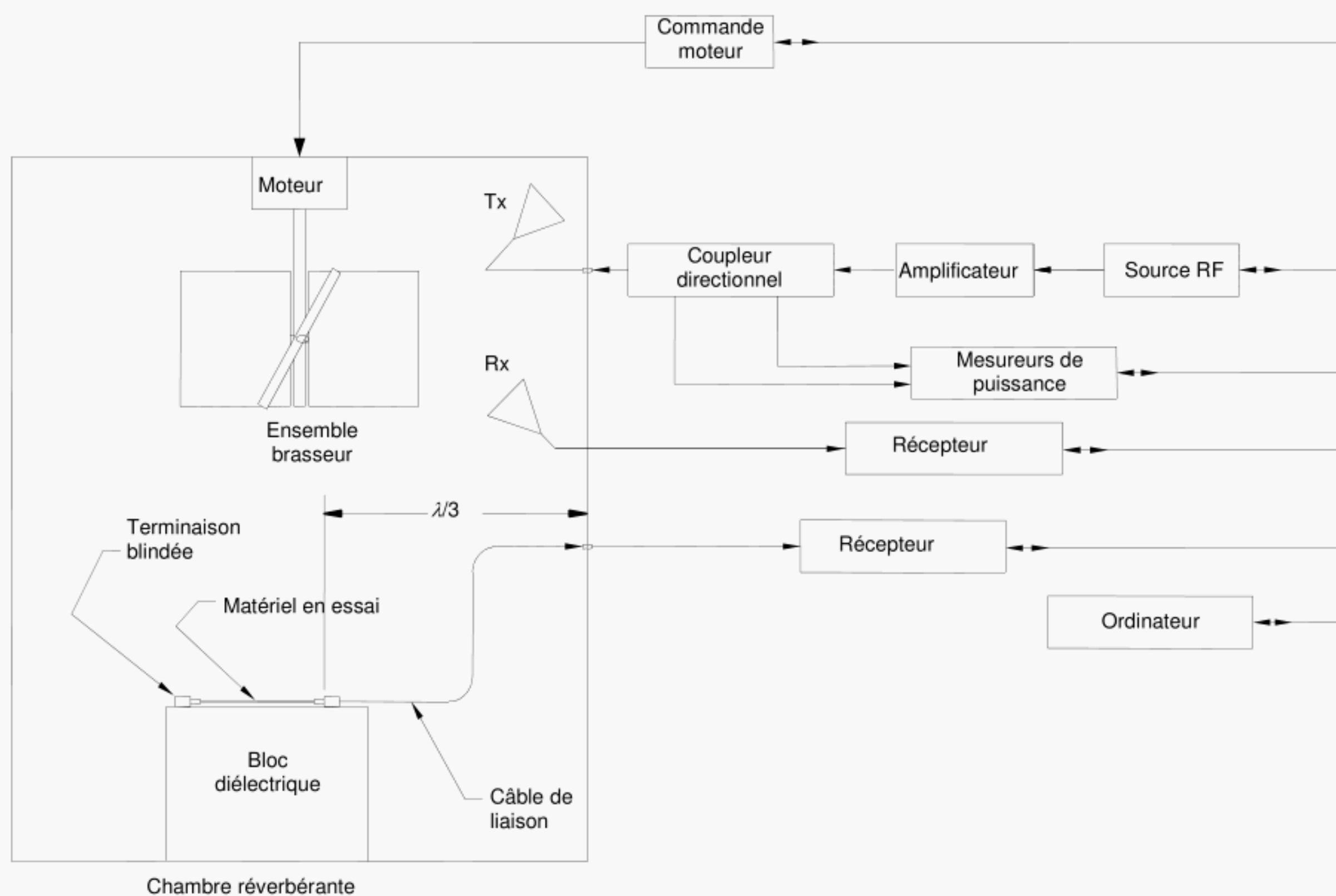
## F.4 Contrôle du montage d'essai

Avant toute mesure, la dynamique du montage d'essai doit être vérifiée en utilisant les mêmes dispositifs de liaison et les mêmes terminaisons que pour le matériel en essai, sauf que le matériel en essai est remplacé par un dispositif bien blindé. La dynamique doit être supérieure d'au moins 5 dB au blindage désiré.

## F.5 Documents de référence

- [1] CEI 61726, *Câbles, cordons, connecteurs et composants hyperfréquence passifs – Mesure de l'atténuation d'écran par la méthode de la chambre réverbérante*
- [2] CEI 60169-1-3, *Connecteurs pour fréquences radioélectriques – Première partie: Prescriptions générales et méthodes de mesure – Section trois – Méthodes d'essai et de mesures électriques: Efficacité d'écran*
- [3] CEI 61000-5-7, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5-7: Guide d'installation et d'atténuation – Degrés de protection procurés par les enveloppes contre les perturbations électromagnétiques (Code EM)*





IEC 096/11

**Figure F.1 – Montage type d'essai**



## **Annexe G** (informative)

### **Mesures de l'efficacité de blindage des joints d'étanchéité et des matériaux**

#### **G.1 Vue d'ensemble**

Comme pour les essais d'immunité aux perturbations rayonnées, il existe de nombreuses techniques d'essai disponibles pour évaluer les performances de blindage des joints d'étanchéité, des matériaux de fenêtre et d'autres configurations de systèmes conçus pour fournir un blindage [1]<sup>8</sup> [2], [3]. Généralement, une mesure d'efficacité de blindage compare l'environnement électromagnétique à l'intérieur d'une enceinte avec et sans le matériau ou le joint d'étanchéité de blindage en place. Les techniques d'essai d'efficacité de blindage sont décrites dans de nombreuses sources telles que la MIL-STD-285 [12]. Malheureusement, de nombreuses mesures d'efficacité de blindage se distinguent par leur manque de reproductibilité et de possibilité de comparaison installation à installation. Certaines de ces divergences peuvent être attribuées à la technique d'essai, tandis que certaines autres sont imputables à l'élément en essai. De nombreux facteurs tels que la condition de mise en contact des surfaces et l'application d'un couple aux fixations peuvent affecter de manière notable la reproductibilité des mesures d'efficacité de blindage.

Pour nombre de conceptions de blindage (par exemple, joints d'étanchéité, fenêtres, etc.), les essais de réverbération utilisent une approche de type «chambre imbriquée» (par exemple, une chambre réverbérante à l'intérieur d'une chambre réverbérante). Une antenne de réception et un brasseur en roue à pales sont placés dans une installation d'essai pour détecter toute énergie radioélectrique qui «fuit» dans l'installation. Il convient que les lecteurs qui ne connaissent pas bien l'utilisation des chambres réverbérantes pour les mesures de l'efficacité de blindage consultent une ou plusieurs des références disponibles [4], [5], [6], [7].

De nombreux facteurs d'un montage d'essai doivent être contrôlés avec la plus grande attention pour obtenir la reproductibilité d'un essai d'efficacité de blindage. En partant de l'hypothèse que l'on peut contrôler ces facteurs, l'uniformité de l'environnement électromagnétique dans une chambre réverbérante fournit un essai d'efficacité de blindage sous tous les angles d'exposition avec une excellente reproductibilité d'une installation à une autre.

NOTE 1 Des différences mineures dans la conception/la construction des aménagements d'essai peuvent avoir une influence importante sur les résultats d'essai. Il convient que les matériaux des aménagements, l'espacement des boulons, les finitions de surface, les réglages de couple, etc. soient tous contrôlés afin d'obtenir des résultats reproductibles. En raison du grand nombre de variations qui seraient nécessaires pour couvrir les nombreux joints d'étanchéité et matériaux différents qui nécessitent une évaluation, la présente annexe ne contient pas pour l'instant de lignes directrices détaillées pour la conception des aménagements d'essai. Le développement d'une ou de plusieurs installations génériques est à l'étude pour des révisions futures de la présente annexe.

NOTE 2 Les procédures contenues dans la présente annexe partent du principe qu'une quantité nominale de blindage est fournie par le joint d'étanchéité ou le matériau en cours d'évaluation. Si le blindage fourni par le matériau et/ou le joint d'étanchéité en essai est inférieur à 10 dB, le «facteur de qualité» «Q» de l'installation d'essai n'est alors pas indépendant de celui de la chambre. Dans de tels cas, le facteur d'étalonnage de fixation d'essai (G.3.8) n'est pas applicable et les méthodes décrites en [8] sont appliquées.

NOTE 3 La procédure suppose que l'ouverture de l'installation est de très grande dimension (de l'ordre d'un côté entier de l'aménagement d'essai). Si tel est le cas, alors, en utilisant le montage d'essai présenté à la Figure G.1 et sans l'ouverture, il convient que la puissance reçue sur l'antenne Rx de référence soit similaire à la puissance reçue par l'antenne Rx. Si tel n'est pas le cas, il convient alors de ne pas utiliser cette procédure, et les méthodes décrites en [8] sont appliquées.

---

<sup>8</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article G.7. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



## G.2 Mesure de l'efficacité de blindage

La mesure de l'efficacité de blindage ( $SE$ ) est fondée sur la comparaison de la puissance électromagnétique à l'extérieur du matériel en essai avec la puissance électromagnétique qui se propage dans le matériel en essai. L'efficacité de blindage est définie comme suit:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{G.1})$$

où

$P_{\text{EUT}}$  est la puissance couplée au matériel en essai, et

$P_{\text{Ref}}$  est la puissance couplée à l'antenne de référence.

## G.3 Description du montage d'essai

### G.3.1 Généralités

Pour les essais des joints d'étanchéité et des matériaux, il est généralement nécessaire de construire une installation d'essai sur laquelle l'élément à évaluer est monté. Dans certains cas, des enceintes entières peuvent être construites dans le matériau à évaluer. Dans de tels cas, il convient d'utiliser les procédures décrites à l'Annexe H. La méthode de mesure de l'efficacité de blindage avec la chambre réverbérante utilise une approche de «chambre imbriquée» (par exemple, une chambre réverbérante à l'intérieur d'une autre chambre réverbérante). Une antenne de réception et un brasseur mécanique sont installés dans une installation d'essai pour détecter toute énergie radioélectrique qui «fuit» dans l'installation. Il convient que le brasseur mécanique soit aussi grand que possible et qu'il continue à maintenir une distance de séparation de  $\lambda/4$  par rapport à l'antenne de réception. Un exemple de «chambre imbriquée» est représenté à la Figure G.1. Pour les éléments d'essai tels que les matériaux et les fenêtres, des ouvertures peuvent être réalisées dans la plaque de couverture.

NOTE Les procédures contenues dans la présente annexe ne distinguent pas le blindage fourni par une ouverture de celui fourni par le joint d'étanchéité ou le matériau utilisé conjointement avec cette ouverture. S'il est souhaitable d'établir une distinction entre le blindage fourni par l'ouverture et celui fourni par le joint d'étanchéité ou le matériau en essai, il est recommandé d'utiliser les procédures décrites en [8].

### G.3.2 Montage d'essai pour les matériaux

Pour les essais des matériaux, une installation d'essai est nécessaire. Il convient que l'installation, dont un exemple est représenté à la Figure G.2, ait des surfaces compatibles avec le joint d'étanchéité à utiliser. Le matériau qui doit être évalué peut remplacer une plaque de couverture ou être monté sur une ouverture de cette plaque au cours des essais. La taille de l'installation détermine la fréquence la plus faible à laquelle les données utilisables peuvent être obtenues. Pour la plupart des installations, cette fréquence utilisable la plus faible peut être estimée en déterminant la fréquence pour laquelle l'installation a environ 60 modes. La formule pour déterminer cette fréquence est représentée en G.3.8 (1). Sinon, étalonner l'installation en utilisant la procédure décrite en B.1.2.

### G.3.3 Montage d'essai pour les joints d'étanchéité

Pour les essais des joints d'étanchéité, une installation d'essai est nécessaire. Il convient que l'installation, dont un exemple est représenté à la Figure G.2, ait des surfaces représentatives de l'application. La taille de l'installation détermine la fréquence la plus faible à laquelle les données utilisables peuvent être obtenues. Pour la plupart des installations, cette fréquence utilisable la plus faible peut être estimée en déterminant la fréquence pour laquelle l'installation a environ 60 modes. La formule pour déterminer cette fréquence est représentée en G.3.8 (1). Sinon, déterminer la fréquence utilisable la plus faible de l'installation en utilisant la procédure décrite en B.1.2.



### G.3.4 Chambre réverbérante

L'enceinte blindée doit être équipée d'accès multiples pour permettre la connexion de l'installation d'essai à l'équipement de mesure.

### G.3.5 Antennes

Les antennes d'émission doivent être efficaces aux fréquences utilisées pour les essais. Il est très important que l'efficacité des antennes d'émission dans l'installation soit aussi élevée que possible.

L'efficacité de l'antenne de réception doit être la même pour caractériser l'installation d'essai et pour collecter les données de blindage. Il est recommandé d'utiliser la même antenne.

L'efficacité de l'antenne de réception n'est pas critique; cependant, pour assurer une dynamique correcte, il convient qu'elle soit aussi élevée que possible.

### G.3.6 Montage d'essai

Les équipements et les composants d'essai essentiels requis pour une mesure de l'efficacité de blindage automatisée sont représentés à la Figure G.1. Noter que des préamplificateurs, des amplificateurs et d'autres composants peuvent également être requis afin d'obtenir la dynamique désirée.

### G.3.7 Dispositifs de liaison

Les dispositifs de liaison sont généralement des lignes coaxiales à 50 Ω avec une efficacité d'écran supérieure d'au moins 10 dB à l'efficacité de blindage désiré.

Tous les dispositifs de liaison doivent être caractérisés en atténuation avant le début de l'essai. Ceci inclut les dispositifs de liaison pour l'antenne de réception du matériel en essai, la ou les antenne(s) d'émission, et l'antenne de référence.

### G.3.8 Validation de l'installation d'essai

Avant de réaliser tout essai, il convient d'étalonner l'installation d'essai. Le but est de déterminer le facteur de qualité ou «*Q*» de l'installation d'essai, de manière à ce que tout effet que le «*Q*» de la cavité a sur le signal reçu puisse être pris en compte. La procédure de validation est la suivante:

- (1) Déterminer la fréquence utilisable la plus faible pour la fixation d'essai en calculant la fréquence à laquelle l'installation a au moins 60 modes possibles ( $N = 60$ ) en utilisant la formule suivante (pour les installations d'essai rectangulaires) [4]:

$$N = \frac{8\pi}{3} abd \frac{f^3}{c^3} - (a + b + d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (\text{G.2})$$

où

$a$ ,  $b$ , et  $d$  sont les dimensions de l'installation en m,

$c$  est la vitesse de propagation des ondes dans l'installation (m/s), et

$f$  est la fréquence en Hz.

NOTE 1 Il convient que la dimension la plus faible de l'ouverture de l'installation soit d'au moins  $\lambda/2$  à la fréquence utilisable la plus faible afin de minimiser les effets de coupure. L'Equation (G.2) peut être généralisée pour les installations d'essai de forme arbitraire (non rectangulaire) [8].

- (2) Configurer l'installation d'essai pour la validation en installant une antenne d'émission à l'intérieur de l'installation d'essai comme représenté à la Figure G.3. Il convient que le



brasseur mécanique soit le plus grand possible et continue à maintenir une distance de séparation de  $\lambda/4$  par rapport à l'antenne de réception. Il est souhaitable de diriger l'antenne de réception vers un coin. Diriger l'antenne de réception vers le brasseur est acceptable. Il convient que les points d'alimentation vers l'installation d'essai pour le dispositif de liaison d'antenne de réception et la puissance du brasseur soient bien blindés. Il convient que le blindage des points d'alimentation soit supérieur d'au moins 5 dB à l'efficacité du blindage désiré.

- (3) Configurer l'installation d'essai comme elle sera pour l'essai en installant le joint d'étanchéité et/ou le matériau à soumettre à essai. Pour chaque fréquence d'essai, faire entrer une puissance connue dans l'antenne d'émission à l'intérieur de l'installation d'essai (c'est-à-dire que la validation doit être effectuée aux bornes des antennes d'émission et de réception). Enregistrer la puissance maximale reçue par l'antenne de réception de l'installation d'essai sur une rotation du brasseur à l'intérieur de l'installation d'essai, et enregistrer les puissances incidente et réfléchie présentes au niveau de l'antenne d'émission de l'installation d'essai à l'emplacement du brasseur ayant donné lieu au signal maximal reçu.

NOTE 2 Les essais d'efficacité de blindage sont bien adaptés aux techniques par brassage de modes du fait du temps de réponse généralement rapide des récepteurs utilisés. Si le mode continu est utilisé, s'assurer que les aspects couverts par l'Annexe C sont traités de manière appropriée. Si le brassage pas à pas est utilisé, appliquer au moins le nombre minimal de pas indiqué à l'Annexe B où  $f_s$  est réglé à la fréquence à laquelle l'installation d'essai a 60 modes possibles.

- (4) Déterminer le facteur de validation de l'installation d'essai ( $TFVF$ ) en prenant le rapport de la puissance émise sur la puissance maximale reçue.

$$TFVF = \frac{P_{\text{MaxRec}}}{P_{\text{Entrée}}} \quad (\text{G.3})$$

où

$P_{\text{MaxRec}}$  est la puissance maximale reçue (en watts) aux bornes de l'antenne par l'antenne de réception de l'installation d'essai au cours d'une rotation du brasseur monté à l'intérieur de l'installation d'essai, et

$P_{\text{Entrée}}$  est la puissance résultante à l'entrée des bornes (en watts) de l'antenne d'émission à l'intérieur de l'installation d'essai. La puissance d'entrée est calculée à partir des mesures de la puissance incidente et réfléchie à l'étape (3):  $P_{\text{Entrée}} = P_{\text{Incidente}} - P_{\text{Réfléchie}}$

- (5) Si l'on dispose du temps nécessaire, répéter cette procédure deux fois de plus, en utilisant différents emplacements des antennes d'émission et de réception à l'intérieur de l'installation d'essai. Pour chaque fréquence, utiliser la moyenne des puissances maximales reçues pour déterminer la perte d'insertion (c'est-à-dire, lorsque trois combinaisons d'antennes d'émission et de réception doivent étalonner l'installation d'essai, utiliser la moyenne des trois valeurs maximales lues pour calculer le facteur de validation de l'installation d'essai pour chaque fréquence). La puissance émise doit être la même à chaque opération. Si l'on n'utilise pas la même puissance émise pour chaque opération, calculer le facteur de validation de l'installation d'essai pour chaque opération, puis calculer le facteur de validation de l'installation d'essai moyen pour cette même installation.

### G.3.9 Détermination de la dynamique de mesure

Avant de réaliser tout essai, il convient de déterminer la dynamique de mesure comme suit:

- (1) Retirer le matériau ou la plaque de couverture de l'installation d'essai et s'assurer que l'antenne de réception est en place.

NOTE 1 Il convient que ceci revienne essentiellement à retirer un côté de l'installation.

- (2) Retirer l'antenne d'émission et les dispositifs de liaison d'émission de l'installation et fixer une terminaison blindée à l'accès de liaison de l'antenne d'émission de l'installation



d'essai. Il convient que cette terminaison blindée présente un blindage d'au moins 10 dB supérieur à celui à mesurer.

- (3) Pour chaque fréquence d'essai, émettre une puissance connue vers l'antenne d'émission de la chambre (de nouveau, la validation doit être effectuée aux bornes d'antenne) et enregistrer la puissance maximale reçue par l'antenne de réception de l'installation d'essai pour une rotation du brasseur de la chambre.

NOTE 2 Les essais d'efficacité de blindage sont bien adaptés aux techniques par brassage de modes du fait du temps de réponse généralement rapide des récepteurs utilisés. Si le mode continu est utilisé, s'assurer que les aspects couverts par l'Annexe C sont traités de manière appropriée. Si on utilise le mode pas à pas, appliquer au moins le nombre de pas utilisé pour étalonner la chambre.

- (4) Remplacer l'antenne de réception de l'installation d'essai par une terminaison bien blindée.  
(5) Répéter l'étape (3).

NOTE 3 Il convient que la même puissance d'entrée vers la chambre soit utilisée ou que la puissance reçue de chaque point de donnée soit normalisée à la puissance d'entrée de chambre.

- (6) Remplacer l'antenne de réception de l'installation d'essai.  
(7) Déterminer la dynamique du montage de mesure en prenant le rapport entre les valeurs lues enregistrées aux étapes (3) et (5) et en corrigeant la perte d'insertion de l'installation d'essai comme cela est représenté à l'Equation (G.4). S'assurer que cette valeur est supérieure d'au moins 5 dB au blindage désiré.

$$Dynamique = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{RxAntenne}}{P_{RxTerminaison}} \right) + 10 \log_{10}(TFVF) \quad (G.4)$$

où

$P_{RxAntenne}$  est la puissance maximale reçue par l'antenne de réception de l'installation d'essai,

$P_{RxTerminaison}$  est la puissance maximale reçue aux bornes de l'antenne de réception de l'installation d'essai avec l'antenne remplacée par la terminaison, et

$TFVF$  est le facteur de validation de l'installation d'essai décrit en G.3.8 (4).

## G.4 Procédure de mesure

### G.4.1 Généralités

Réaliser les essais en utilisant les procédures du mode pas à pas ou du mode continu. Pour le fonctionnement en mode pas à pas, le brasseur de la chambre doit utiliser au moins le même nombre de pas que celui utilisé pour la validation de la chambre. Le brasseur de l'installation d'essai doit utiliser le même nombre de pas que celui utilisé au G.3.8 (3). Lorsqu'on utilise des procédures en mode pas à pas, il convient que les deux dispositifs de brassage de chambre subissent une rotation de manière à ce que le brasseur de l'installation d'essai fasse une révolution complète pour chaque pas du brasseur de la chambre. Lorsqu'on utilise des procédures en mode continu, la vitesse maximale de rotation du brasseur doit assurer que le matériel en essai et l'équipement de mesure associé sont exposés au moins au nombre d'échantillons qui serait obtenu en utilisant les techniques en mode pas à pas. S'assurer que, pour toute procédure, l'équipement de mesure peut échantillonner le niveau de champ pendant le temps de palier approprié. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement en mode continu.

NOTE Il est souvent pratique d'utiliser une combinaison de mode pas à pas et de mode continu. Le brasseur de chambre subit une rotation complète en utilisant le même nombre de pas utilisé dans la validation de la chambre pendant que le brasseur de l'installation d'essai subit une rotation continue. Pour chaque position (pas) du brasseur de la chambre, le brasseur de l'installation d'essai fait une révolution complète. La vitesse de rotation du brasseur de l'installation d'essai est la même que celle utilisée en G.3.8 (3). Ceci assure que la vitesse d'échantillonnage de l'équipement de mesure est telle que le nombre nécessaire d'échantillons est obtenu au cours de chaque rotation du brasseur de l'installation d'essai. Voir l'Annexe C pour avoir des conseils sur la vitesse maximale de brassage.



Le paramètre mesuré est la puissance maximale reçue. Pour les mesures fondées sur la puissance maximale reçue, il convient que la dynamique du système de mesure soit supérieure d'au moins 5 dB au blindage désiré.

#### G.4.2 Mesure du matériel en essai

La procédure est la suivante:

- (1) Connecter la source radioélectrique à la chambre (par l'intermédiaire d'un amplificateur si nécessaire).
- (2) Connecter l'équipement de mesure à l'antenne de réception de l'installation d'essai (par l'intermédiaire d'un préamplificateur si nécessaire).
- (3) Connecter l'antenne de référence de la chambre à l'équipement de contrôle de cette dernière (par l'intermédiaire d'un atténuateur si nécessaire).
- (4) Installer le joint d'étanchéité et/ou le matériau à soumettre à essai sur l'installation d'essai.
- (5) Mettre en mouvement le ou les brasseurs de la chambre et de l'installation d'essai.
- (6) Injecter la première fréquence d'essai dans la chambre à une puissance d'entrée fixée.
- (7) Enregistrer la valeur lue maximale de l'équipement de contrôle de la chambre et de l'équipement de contrôle du matériel en essai sur un cycle complet du ou des brasseurs.
- (8) Répéter l'étape (7) pour toutes les fréquences d'essai.
- (9) Installer un matériau de blindage connu (feuille ou bande d'aluminium ou de cuivre) sur les zones sur lesquelles on suspecte une fuite. Ne pas appliquer de blindage complémentaire aux points d'alimentation ou à toute autre zone d'installation d'essai ne faisant pas partie de l'évaluation.
- (10) Réaliser un essai de fuite en répétant les étapes (5) à (8).

NOTE Il convient que la même puissance d'entrée vers la chambre soit utilisée à la fois pour la collecte des données et pour l'essai de fuite. Si une puissance d'entrée différente est utilisée, il convient que toutes les données soient alors normalisées en fonction de la puissance d'entrée dans la chambre avant de calculer l'efficacité de blindage.

- (11) L'efficacité de blindage (SE) peut ensuite être calculée en utilisant l'expression ci-dessous, en tenant compte de l'affaiblissement des liaisons à la fois pour le matériel en essai et pour l'antenne de référence.

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) - 10 \log_{10}(TFVF) \quad (\text{G.5})$$

où

$P_{\text{EUT}}$  est la puissance maximale reçue par l'antenne de réception de l'installation d'essai (corrigée pour tenir compte de la perte de la liaison),

$P_{\text{Ref}}$  est la puissance maximale reçue par l'antenne de référence de la chambre (corrigée pour tenir compte de la perte de la liaison), et

$TFVF$  est le facteur de validation de l'installation d'essai décrit en G.3.8 (4), Equation (G.3).

- (12) L'essai de «fuite» de l'étape (10) est réalisé pour s'assurer que la fuite mesurée est entrée par une zone de l'installation d'essai qui faisait partie de l'évaluation et n'est pas le résultat d'une modification de l'installation d'essai telle que les points d'alimentation en puissance du brasseur et ceux des lignes de réception. Déterminer l'efficacité de blindage de la présente configuration en utilisant l'Equation (G.5) en remplaçant les puissances reçues à l'étape (10). Si l'efficacité de blindage obtenue à l'étape (10) n'est pas au moins supérieure de 5 dB à l'efficacité de blindage obtenue pour le montage d'essai non modifié, alors l'efficacité de blindage est considérée comme étant supérieure ou égale à l'efficacité de blindage du montage d'essai non modifié. Si on



désire une efficacité de blindage plus importante, un plus grand nombre d'investigations concernant les points d'entrée dans le système de mesure est alors justifié.

#### G.4.3 Méthode alternative de mesure du matériel en essai

Si deux ensembles d'équipement de mesure ne sont pas disponibles, l'équipement de mesure peut alors être connecté tour à tour au matériel en essai et à l'antenne de référence.

Si deux ensembles de liaison sont utilisés, l'efficacité de blindage doit être calculée en tenant compte de l'affaiblissement des liaisons à la fois pour le matériel en essai et pour l'antenne de référence.

Si un seul ensemble de liaison est utilisé, alors l'affaiblissement de la liaison peut être ignoré et le blindage est la différence entre les deux puissances reçues.

### G.5 Section de transmission

#### G.5.1 Généralités

Une autre manière d'évaluer l'efficacité de blindage est en termes de section de transmission ( $\sigma_a$ ). La section transversale de transmission est définie comme suit:

$$P_{\text{Trans}} = \sigma_a S_{\text{inc}} \quad (\text{G.6})$$

où

$P_{\text{Trans}}$  est la puissance émise à travers l'ouverture, en W, et

$S_{\text{inc}}$  est la puissance surfacique de champ incident sur l'ouverture, en W/m<sup>2</sup> [10], [11].

En général, si le champ incident est une onde plane,  $\sigma_a$  dépend de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde. Lorsque  $\sigma_a$  est mesurée en utilisant les chambres réverbérantes, la  $\sigma_a$  qui en résulte est une moyenne isotrope de tous les angles d'incidence et de toutes les polarisations. Ceci est dû à la nature isotrope de l'environnement dans la chambre réverbérante.

Pour obtenir la section transversale de transmission, les données collectées en G.3.8 doivent être modifiées. En enregistrant la puissance moyenne reçue en G.3.8 (3) à la place de la puissance maximale reçue, et en calculant la réciproque du *TFVF* fondée sur la puissance moyenne, la section de transmission, en mètres carrés, peut être calculée en utilisant la formule suivante.

$$\sigma_a = \frac{\lambda^2 \times \eta_{\text{Rx}} \times \eta_{\text{Tx}}}{8\pi} \frac{P_{\text{Entrée}}}{P_{\text{MoyRec}}} \frac{\langle P_{\text{Installation d'essai}} \rangle}{\langle P_{\text{Référence}} \rangle} \quad (\text{G.7})$$

où

$\frac{P_{\text{Entrée}}}{P_{\text{MoyRec}}}$	est la réciproque du <i>TFVF</i> provenant de G.3.8 (4) calculée en utilisant la puissance moyenne reçue au lieu de la puissance maximale reçue,
$\langle P_{\text{Installation d'essai}} \rangle$	est la puissance moyenne reçue par l'antenne à l'intérieur de l'installation d'essai,
$\langle P_{\text{Référence}} \rangle$	est la puissance moyenne reçue provenant de l'antenne de référence de la chambre,



$\eta_{Rx}$  et  $\eta_{Tx}$  représentent l'efficacité des antennes de réception (référence) et d'émission (installation d'essai) (adimensionnelle), et  
 $\lambda$  est la longueur d'onde à la fréquence d'excitation.

### G.5.2 Estimation de l'efficacité de blindage d'une enceinte

L'efficacité moyenne de blindage d'une enceinte électriquement grande peut être estimée comme suit:

$$\langle SE \rangle = \frac{2\pi V}{\sigma_a \lambda Q} \quad (G.8)$$

où

$V$  et  $Q$  représentent le volume (en m<sup>3</sup>) et le facteur de qualité de l'enceinte (installation d'essai), et

$\lambda$  est la longueur d'onde d'excitation en m.

NOTE Le signe  $\langle \rangle$  indique la moyenne prise sur tous les points à l'intérieur de l'enceinte. C'est une moyenne sur l'allure de l'onde stationnaire du champ dans la cavité.

### G.6 Contrôle du montage d'essai

Avant toute mesure, la dynamique du montage d'essai doit être vérifiée en utilisant les mêmes dispositifs de liaison que pour le matériel en essai. La dynamique doit être supérieure d'au moins 10 dB au blindage désiré.

Avant toute mesure du blindage de matériau, le facteur de validation de l'installation d'essai (TFVF) doit être déterminé. Il est recommandé que le TFVF soit obtenu en utilisant des échantillons d'essai réels.

La détermination de la perte d'insertion de l'installation d'essai (G.3.87) peut être omise, si la valeur  $Q$  de l'installation d'essai est similaire à celle de l'application prévue du matériau ou du joint d'étanchéité soumis à essai. En outre, lorsque des essais sont réalisés sur des éléments multiples pour déterminer l'efficacité de blindage en relatif, la validation de l'installation d'essai peut être également omise.

Les données peuvent être collectées à des fréquences inférieures à la fréquence utilisable la plus faible de l'installation d'essai. Il convient que les données soient examinées avec soin étant donné que les incertitudes de mesure augmentent rapidement en dessous de la fréquence utilisable la plus faible.

NOTE 1 La procédure de collecte des données est une séquence possible de collecte des données désirées. En fonction du type de récepteur, de la source radioélectrique et du contrôle de déplacement utilisé, de nombreuses variations sont possibles qui donnent lieu à la collecte des données requises. Par exemple, on peut utiliser un analyseur de spectre en mode maximal comme récepteur, et le régler pour enregistrer le signal reçu sur une large gamme de fréquences, tout en réglant pas par pas la fréquence d'entrée de la chambre sur la même gamme. Si le temps de palier à chaque fréquence est tel que le brasseur de l'installation réalise une révolution pour chacun des pas nécessaires pour faire réaliser une révolution au brasseur de la chambre, alors la quantité d'échantillons nécessaire est collectée à chaque fréquence.

NOTE 2 A moins que le matériau de blindage soit non réciproque (par exemple, ferrite magnétisée ou semi-conducteur), il est possible d'obtenir la même information en émettant vers l'installation d'essai et en mesurant la quantité d'énergie radioélectrique qui fuit de l'installation d'essai.

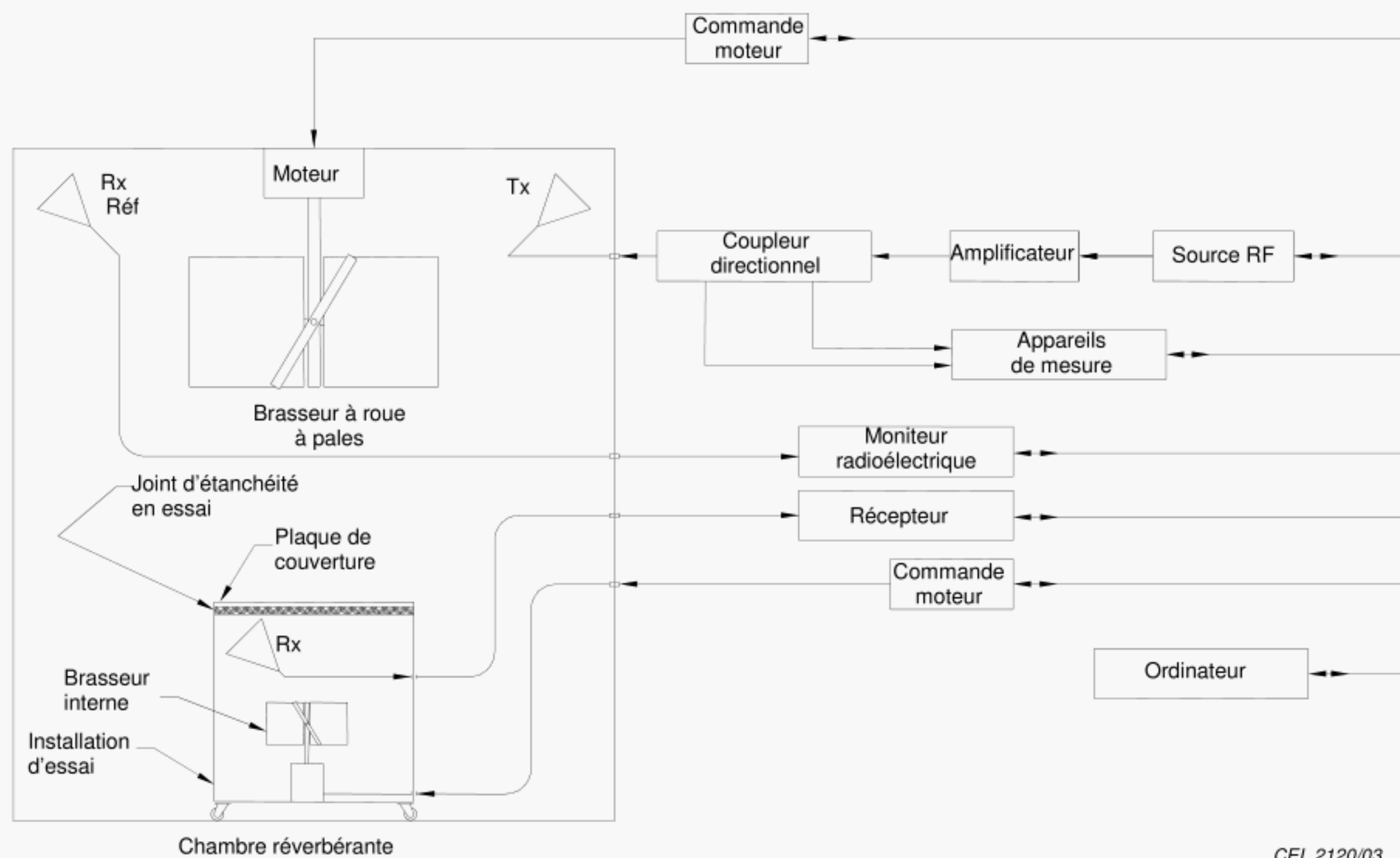
NOTE 3 Il est possible de déterminer la quantité approximative d'énergie absorbée par le matériau en essai en comparant le facteur d'étalonnage de l'installation d'essai, le matériau étant en place, au facteur d'étalonnage de l'installation obtenu avec une plaque en aluminium à la place du matériau en essai.



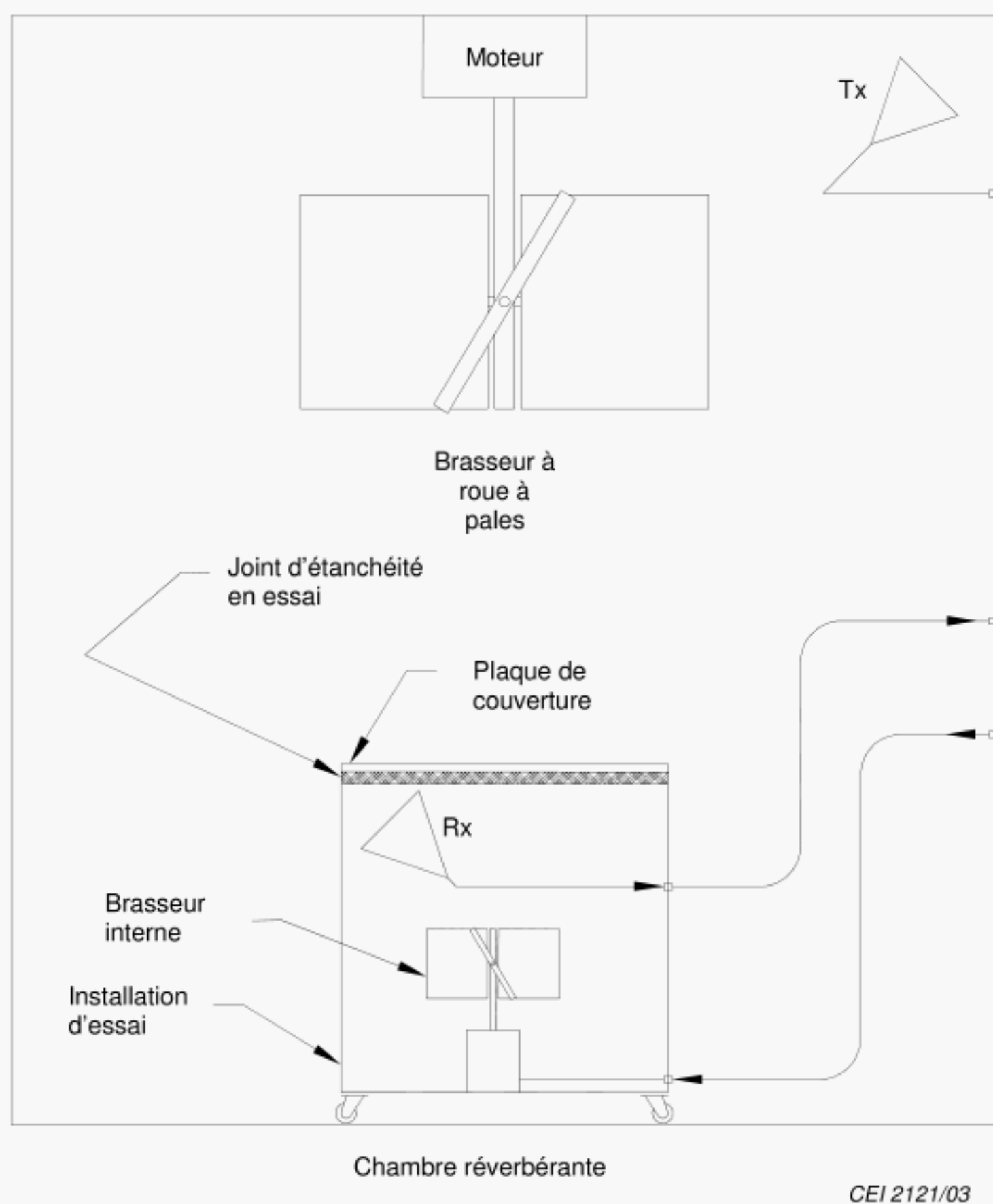
## G.7 Documents de référence

- [1] CEI 61726, *Câbles, cordons, connecteurs et composants hyperfréquence passifs – Mesure de l'atténuation d'écran par la méthode de la chambre réverbérante*
- [2] CEI 60169-1-3, *Connecteurs pour fréquences radioélectriques – Première partie: Prescriptions générales et méthodes de mesure – Section trois – Méthodes d'essai et de mesures électriques: Efficacité d'écran*
- [3] CEI 61000-5-7, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5-7: Guide d'installation et d'atténuation – Degrés de protection procurés par les enveloppes contre les perturbations électromagnétiques (Code EM)*
- [4] HATFIELD, MO. Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: A comparison of two approaches. IEEE Transactions on EMC, August 1988, Vol. 30, No. 3, p. 229-238.
- [5] FREYER, GJ. and HATFIELD, MO. Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements, part I. IEEE Int. Symposium on EMC, Anaheim, CA, August 1992, p. 139-141.
- [6] HATFIELD, MO. and FREYER, GJ. Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements – part II. IEEE Int. Symposium on EMC, Anaheim, CA, August 1992, p.142-148.
- [7] HE, Y, MARVIN, AC and FLINTOFT, ID, A study of the field statistics in nested frequency-stirred reverberation chambers, URSI 29<sup>th</sup> General Assembly, August 2008.
- [8] HOLLOWAY, CL., HILL, D., LADBURY, J., KOEPKE, G. and GARZIA, R. Shielding effectiveness measurements of materials in nested reverberation chambers" IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no. 1 (or 2), 2003.
- [9] ARNAUT, LR. Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies. IEEE Trans. EMC, Nov. 2001, vol. 43, nr. 4, p. 637-653.
- [10] MARTIN, T., BÄCKSTRÖM, M. and LORÉN, J. Transmission cross section of apertures determined by measurements and FDTD simulations. 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, February 18-20, 1997, p. 245-250.
- [11] QUINE, JP. Distortion of radiation pattern for leakage power transmitted through attenuation cover panels and shielding gasket – need for reverberation chamber measurement of total leakage power. IEEE Int. Symposium on EMC, Chicago, August 1994, p. 285-290.
- [12] MIL-STD-285, Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes, method of.



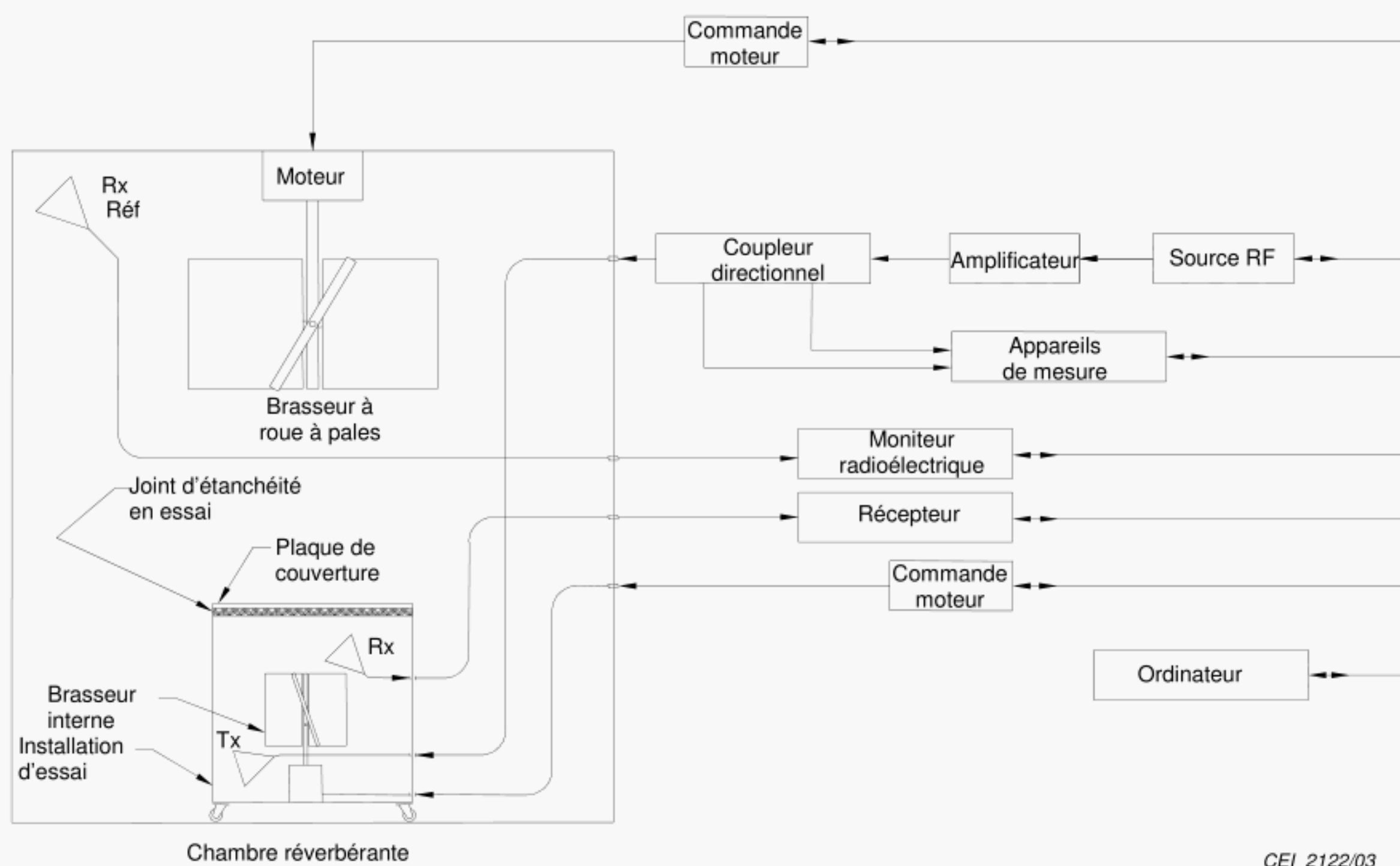


**Figure G.1 – Montage type d'essai**



**Figure G.2 – Installation d'essai type pour les essais de joint d'étanchéité et/ou matériau**





CEI 2122/03

**Figure G.3 – Installation d'essai configurée pour la validation**



## Annexe H (informative)

### Mesures de l'efficacité de blindage des enceintes

#### H.1 Vue d'ensemble

Comme pour les essais d'immunité aux perturbations rayonnées, il existe de nombreuses techniques d'essai disponibles pour évaluer les performances de blindage des joints d'étanchéité, des matériaux de fenêtre et d'autres configurations de systèmes conçus pour fournir un blindage [1]<sup>9</sup>, [2], [3]. Généralement, une mesure d'efficacité de blindage compare l'environnement électromagnétique à l'intérieur d'une enceinte avec et sans le blindage en place. Les techniques d'essai d'efficacité de blindage sont décrites dans de nombreuses sources telles que la MIL-STD-285. Malheureusement, de nombreuses mesures d'efficacité de blindage se distinguent par leur manque de reproductibilité et de possibilité de comparaison installation à installation. Certaines de ces divergences peuvent être attribuées à la technique d'essai tandis que certaines autres sont imputables à l'élément en essai. De nombreux facteurs tels que la condition de mise en contact des surfaces et l'application d'un couple aux fixations peuvent affecter de manière notable la reproductibilité des mesures d'efficacité de blindage.

Pour nombre de conceptions de blindage (par exemple, joints d'étanchéité, fenêtres, etc.), les essais de réverbération utilisent une approche de type «chambre imbriquée» (par exemple, une chambre réverbérante à l'intérieur d'une autre chambre réverbérante). Une antenne de réception et un brasseur à roue à pales sont installés dans l'enceinte d'essai pour détecter toute énergie radioélectrique qui «fuit» dans l'enceinte. Il convient que les lecteurs qui ne connaissent pas bien l'utilisation des chambres réverbérantes pour les mesures de l'efficacité de blindage consultent [3], [4], [5] ou [6].

De nombreux facteurs d'un montage d'essai doivent être contrôlés avec la plus grande attention pour obtenir la reproductibilité d'un essai d'efficacité de blindage. En partant de l'hypothèse que l'on peut contrôler ces facteurs, l'uniformité de l'environnement électromagnétique dans une chambre réverbérante fournit un essai d'efficacité de blindage sous tous les angles d'exposition avec une excellente reproductibilité d'une installation à une autre.

#### H.2 Mesure de l'efficacité de blindage des matériels en essai

La mesure de l'efficacité de blindage est fondée sur la comparaison de la puissance du champ électromagnétique à l'extérieur du matériel en essai avec la puissance électromagnétique du champ induite dans le matériel en essai. L'efficacité de blindage est définie comme suit:

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{H.1})$$

où

$P_{\text{EUT}}$  est la puissance couplée au matériel en essai, et  
 $P_{\text{Ref}}$  est la puissance couplée à l'antenne de référence.

<sup>9</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article H.6. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



## **H.3 Description du montage d'essai**

### **H.3.1 Généralités**

Pour les essais des enceintes, il n'est pas nécessaire de construire une installation d'essai sur laquelle l'élément à évaluer est monté. L'élément à soumettre à essai est instrumenté. Les essais d'efficacité de blindage en chambre réverbérante utilisent une approche de «chambre imbriquée» (par exemple, une chambre réverbérante à l'intérieur d'une autre chambre réverbérante). Une antenne de réception et un brasseur à roue à pales sont installés dans l'enceinte d'essai pour détecter toute énergie radioélectrique qui «fuit» dans l'enceinte. L'enceinte doit se situer au moins à  $\lambda/4$  des parois de la chambre. Les enceintes conçues pour fonctionner sur table doivent être situées à  $\lambda/4$  du plancher de la chambre. Les enceintes de sol doivent être sur un support diélectrique à 10 cm au-dessus du plancher.

### **H.3.2 Montage d'essai pour les enceintes**

La taille de l'enceinte détermine la fréquence utilisable la plus faible à laquelle les données utilisables peuvent être obtenues. Pour la plupart des enceintes, cette fréquence peut être estimée en déterminant la fréquence à laquelle l'enceinte a environ 60 modes. La formule pour déterminer cette fréquence est représentée en H.3.7 (1), Equation (H.2). L'enceinte peut être étalonnée en utilisant la procédure décrite en B.1.2 si nécessaire. L'enceinte doit être modifiée en installant une antenne de réception et un montage brasseur mécanique.

### **H.3.3 Chambre réverbérante**

L'enceinte blindée doit être équipée d'accès multiples pour permettre la connexion de l'enceinte d'essai à l'équipement de mesure.

### **H.3.4 Antennes**

Les antennes d'émission doivent être efficaces aux fréquences utilisées pour les essais. Il est très important que cette efficacité des antennes d'émission dans l'enceinte soit aussi élevée que possible.

L'efficacité de l'antenne de réception doit être la même pour caractériser l'enceinte d'essai et pour collecter les données de blindage. Il est recommandé d'utiliser la même antenne. L'efficacité de l'antenne de réception n'est pas critique; cependant, pour assurer une dynamique correcte, il convient qu'elle soit aussi élevée que possible.

### **H.3.5 Montage d'essai**

Les équipements et les composants d'essai essentiels requis pour une mesure de l'efficacité de blindage automatisée sont représentés aux Figures H.1 et H.2. Noter que des préamplificateurs, des amplificateurs et d'autres composants peuvent également être requis afin d'obtenir la dynamique désirée.

### **H.3.6 Dispositifs de liaison**

Les dispositifs de liaison sont généralement des lignes coaxiales à 50  $\Omega$  avec une efficacité d'écran supérieure d'au moins 10 dB à l'efficacité de blindage désiré.

Tous les dispositifs de liaison doivent être caractérisés en atténuation avant le début de l'essai. Ceci inclut les dispositifs de liaison pour l'antenne de réception du matériel en essai, la ou les antenne(s) d'émission, et l'antenne de référence.

### **H.3.7 Préparation de l'enceinte**

A la différence des essais d'efficacité de blindage des joints d'étanchéité et des matériaux, pour lesquels il doit être tenu compte des pertes de l'installation d'essai, les essais des



enceintes n'exigent pas la validation de l'enceinte. Ceci est dû au fait que les pertes associées à l'enceinte font partie du blindage que l'on peut s'attendre à ce que l'enceinte fournisse. La gamme de fréquences sur laquelle des données précises peuvent être obtenues doit toujours être déterminée. Par conséquent, la fréquence utilisable la plus faible, c'est-à-dire la fréquence la plus faible à laquelle on peut s'attendre à ce que l'enceinte à soumettre à l'essai renvoie des données raisonnablement précises, doit être déterminée. Préparer l'enceinte pour les essais comme suit:

- (1) Déterminer la fréquence utilisable la plus faible de l'enceinte en calculant la fréquence à laquelle l'enceinte présente au moins 60 modes possibles ( $N = 60$ ) en utilisant la formule suivante pour les enceintes rectangulaires [4]; pour des enceintes non rectangulaires, voir la Note 1 en G.3.8:

$$N = \frac{8\pi}{3} abd \frac{f^3}{c^3} - (a + b + d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (\text{H.2})$$

où

$a$ ,  $b$ , et  $d$  sont les dimensions de l'enceinte ( $L$ ,  $W$ ,  $H$ ) en m,

$c$  est la vitesse de propagation des ondes dans l'enceinte (m/s), et

$f$  est la fréquence en Hz.

- (2) Configurer l'enceinte pour essai en installant une antenne de réception et un brasseur mécanique à l'intérieur de l'enceinte. Il convient que le brasseur mécanique soit aussi grand que possible et continue à maintenir une distance de séparation de  $\lambda/4$  par rapport à l'antenne de réception. Il est souhaitable de diriger l'antenne de réception vers un coin. Diriger l'antenne de réception vers le brasseur est acceptable. Il convient que les points d'alimentation vers l'enceinte, pour le dispositif de liaison de l'antenne de réception et l'alimentation du brasseur soient bien blindés. Il convient que le blindage des points d'alimentation soit supérieur d'au moins 5 dB au blindage désiré.
- (3) Les essais d'efficacité de blindage sont bien adaptés aux techniques par brassage de modes du fait du temps de réponse généralement rapide des récepteurs utilisés. Si le mode continu est utilisé, s'assurer que les aspects couverts par l'Annexe C sont traités de manière appropriée. Si le mode pas à pas est utilisé, utiliser au moins le nombre minimal de pas indiqué à l'Annexe B, avec  $f_s$  réglé à la fréquence à laquelle l'enceinte a 60 modes possibles.

### H.3.8 Détermination de la dynamique de mesure

Avant de réaliser tout essai, il convient de déterminer la dynamique du système de mesure comme suit:

- (1) Retirer toutes les trappes, portes, etc. nécessaires pour exposer l'intérieur de l'enceinte à soumettre aux essais.

NOTE 1 Si l'enceinte possède une grande porte ou une autre ouverture qui, lorsqu'elle est ouverte, expose complètement l'intérieur de la cavité, le retrait des panneaux d'accès, etc. n'est pas nécessaire.

- (2) Pour chaque fréquence d'essai, émettre une puissance connue vers l'antenne d'émission de la chambre (de nouveau, la validation doit être effectuée aux bornes d'antenne) et enregistrer la puissance maximale reçue par l'antenne de réception de l'enceinte sur une rotation du brasseur de la chambre.

NOTE 2 Les essais d'efficacité de blindage sont bien adaptés aux techniques de brassage de modes du fait du temps de réponse généralement rapide des récepteurs utilisés. Si le mode continu est utilisé, s'assurer que les aspects couverts par l'Annexe C sont traités de manière appropriée. Si on utilise le brassage pas à pas, appliquer au moins le nombre de pas utilisé pour étalonner la chambre.

- (3) Remplacer l'antenne de réception de l'enceinte d'essai par une terminaison bien blindée.
- (4) Répéter l'étape (2).

NOTE 3 Il convient que la même puissance d'entrée vers la chambre soit utilisée ou la puissance reçue de chaque point de données soit normalisée à la puissance d'entrée de chambre.

- (5) Remplacer l'antenne de réception de l'enceinte d'essai.



- (6) Déterminer la dynamique du montage de mesure en prenant le rapport entre les valeurs lues enregistrées aux étapes (3) et (5). S'assurer que cette valeur est supérieure d'au moins 5 dB au blindage désiré en utilisant l'équation suivante:

$$Dynamique = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{RxAntenne}}{P_{RxTerminaison}} \right) \quad (H.3)$$

où

$P_{RxAntenne}$  est la puissance reçue provenant de l'antenne de réception de la chambre, et

$P_{RxTerminaison}$  est la puissance reçue aux bornes de l'antenne de réception de l'enceinte d'essai, l'antenne étant remplacée par la terminaison

## H.4 Procédure de mesure

### H.4.1 Généralités

Réaliser les essais en utilisant les procédures du mode pas à pas ou du mode continu. Pour le fonctionnement en mode pas à pas, le brasseur de la chambre doit utiliser au moins le même nombre de pas que celui utilisé pour la validation de la chambre. Le brasseur de l'enceinte doit utiliser le même nombre de pas que celui utilisé au H.3.8 (3). Lorsqu'on utilise des procédures en mode pas à pas, il convient que les deux dispositifs de brassage subissent une rotation de manière à ce que le brasseur de l'enceinte fasse une révolution complète pour chaque pas du brasseur de la chambre. Lorsqu'on utilise des procédures en mode continu, la vitesse maximale de rotation du brasseur doit assurer que le matériel en essai et l'équipement de mesure associé sont exposés au moins au nombre d'échantillons qui serait rencontré en utilisant les techniques en mode pas à pas. S'assurer que, pour toute procédure, l'équipement de mesure peut échantillonner le niveau de champ pendant le temps de palier approprié. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement en mode continu.

NOTE Il est souvent pratique d'utiliser une combinaison de mode pas à pas et de mode continu. Le brasseur de chambre subit une rotation complète en utilisant le même nombre de pas utilisé dans la validation de la chambre pendant que le brasseur de l'enceinte subit une rotation continue. Pour chaque position (pas) du brasseur de la chambre, le brasseur de l'enceinte fait une révolution complète. La vitesse de rotation du brasseur de l'enceinte d'essai est la même que celle utilisée au H.3.8 (3). Ceci assure que la vitesse d'échantillonnage de l'équipement de mesure est telle que le nombre nécessaire d'échantillons est obtenu au cours de chaque rotation du brasseur de l'enceinte d'essai. Voir l'Annexe C pour avoir des conseils sur la vitesse maximale de brassage.

Le paramètre mesuré est la puissance maximale reçue. Pour les mesures fondées sur la puissance maximale reçue, il convient que la dynamique du système de mesure soit supérieure d'au moins 5 dB à l'efficacité du blindage désiré.

### H.4.2 Mesure du matériel en essai

La procédure est la suivante:

- (1) Connecter la source radioélectrique à la chambre (par l'intermédiaire d'un amplificateur si nécessaire).
- (2) Connecter l'équipement de mesure à l'antenne de réception de l'enceinte d'essai (par l'intermédiaire d'un préamplificateur si nécessaire).
- (3) Connecter l'antenne de référence de la chambre à l'équipement de contrôle de cette dernière (par l'intermédiaire d'un atténuateur si nécessaire).
- (4) Configurer l'enceinte pour les essais.
- (5) Mettre en mouvement le ou les brasseur(s) de la chambre et de l'enceinte.
- (6) Injecter la première fréquence d'essai dans la chambre à une puissance d'entrée fixée.
- (7) Enregistrer la valeur lue maximale de l'équipement de contrôle de la chambre et de l'équipement de contrôle du matériel en essai sur un cycle complet du ou des brasseurs.



- (8) Répéter l'étape (7) pour toutes les fréquences d'essai.
- (9) Installer un matériau de blindage connu (feuille ou bande d'aluminium ou de cuivre) sur les zones sur lesquelles on suspecte une fuite. Ne pas appliquer d'écran complémentaire aux points d'alimentation ou à toute autre zone de l'enceinte qui ne fait pas partie de l'évaluation.
- (10) Réaliser un essai de fuite en répétant les étapes (5) à (9).

NOTE Il convient d'utiliser la même puissance d'entrée vers la chambre à la fois pour la collecte des données et pour l'essai de fuite. Si une puissance d'entrée différente est utilisée, il convient que toutes les données soient alors normalisées par rapport à la puissance d'entrée de la chambre avant de calculer l'efficacité de blindage.

- (11) L'efficacité de blindage peut ensuite être calculée en utilisant l'expression ci-dessous, en tenant compte de l'affaiblissement des liaisons à la fois pour le matériel en essai et pour l'antenne de référence.

$$SE = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad (\text{H.4})$$

où

$P_{\text{EUT}}$  est la puissance maximale reçue par l'antenne de référence de l'enceinte à l'étape (7) (corrigée pour la perte de liaison), et

$P_{\text{Ref}}$  est la puissance reçue par l'antenne de réception de la chambre à l'étape (7) (corrigée pour tenir compte de la perte de liaison).

- (12) L'essai de «fuite» de l'étape (10) a été réalisé pour s'assurer que la fuite mesurée entrainait par une zone de l'enceinte qui faisait partie de l'évaluation, et non pas par l'intermédiaire d'une modification de l'enceinte telle que les points d'alimentation en puissance du brasseur et ceux des lignes de réception. Déterminer l'efficacité de blindage de la présente configuration en utilisant l'Equation (H.4) en remplaçant les puissances reçues à l'étape (10). Si l'efficacité de blindage obtenue à l'étape (10) n'est pas au moins supérieure de 5 dB à l'efficacité de blindage obtenue pour l'enceinte non modifiée, alors l'efficacité de blindage est considérée comme étant supérieure ou égale à l'efficacité de blindage de l'enceinte non modifiée. Si on désire une efficacité de blindage plus importante, un plus grand nombre d'investigations concernant les points d'entrée dans le système de mesure est alors justifié.

#### H.4.3 Méthode alternative de mesure du matériel en essai

Si deux ensembles d'équipement de mesure ne sont pas disponibles, l'équipement de mesure peut alors être connecté tour à tour au matériel en essai et à l'antenne de référence.

Si deux ensembles de liaison sont utilisés, l'efficacité de blindage doit être calculée en tenant compte de l'affaiblissement des liaisons à la fois pour le matériel en essai et pour l'antenne de référence.

Si un seul ensemble de liaison est utilisé, alors l'affaiblissement de la liaison peut être ignoré et le blindage est la différence entre les deux puissances reçues.

#### H.5 Contrôle du montage d'essai

Avant toute mesure, la dynamique du montage d'essai doit être vérifiée en utilisant les mêmes dispositifs de liaison que pour le matériel en essai. La dynamique doit être supérieure d'au moins 5 dB à l'efficacité du blindage désiré.

Les données peuvent être collectées à des fréquences inférieures à la fréquence utilisable la plus faible de l'enceinte. Il convient que les données soient examinées avec soin étant donné que les incertitudes de mesure augmentent rapidement en dessous de la fréquence utilisable la plus faible.

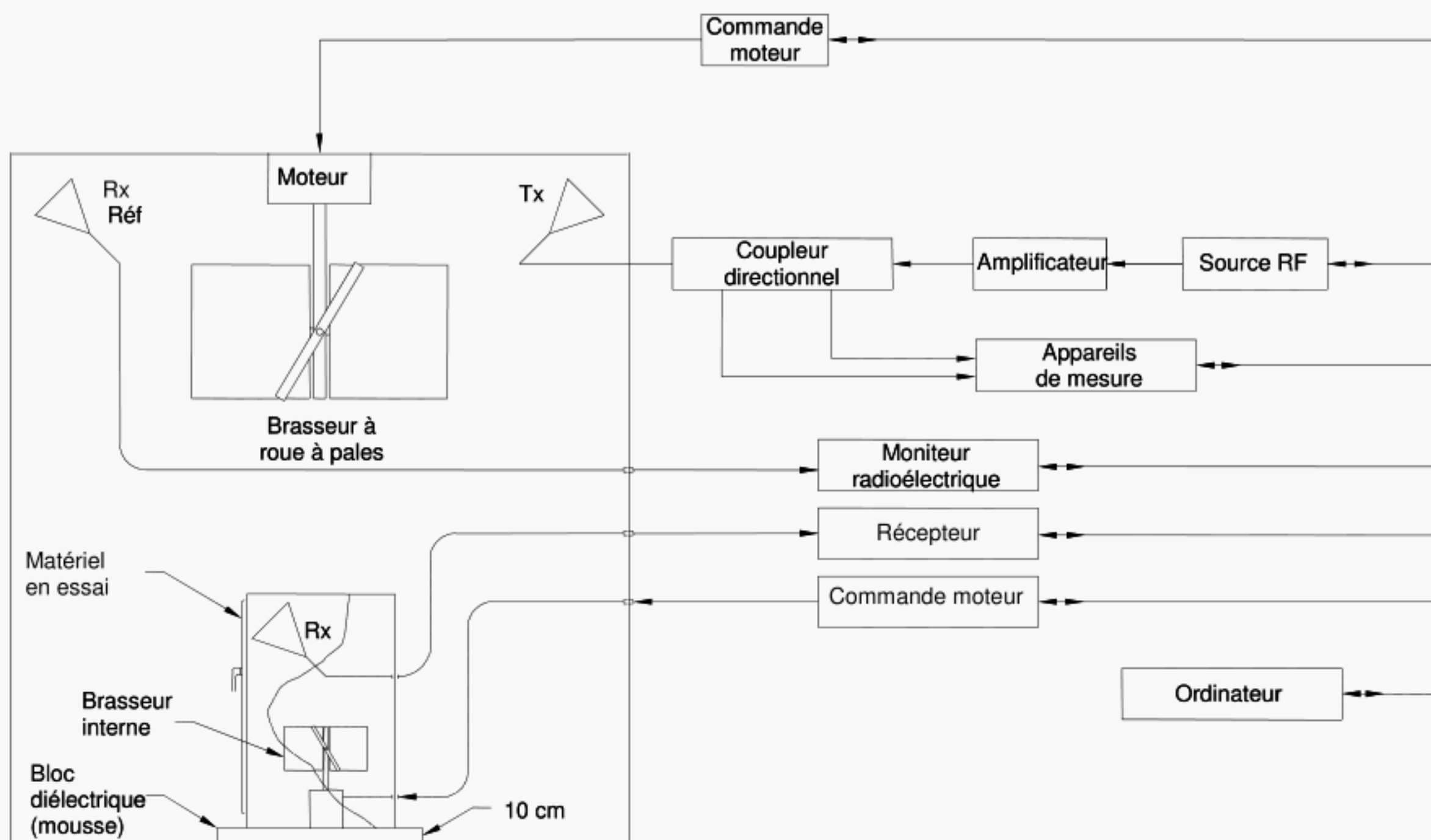


NOTE La procédure de collecte des données est une séquence possible de collecte des données désirées. En fonction du type de récepteur, de la source radioélectrique et du contrôle de déplacement utilisé, de nombreuses variations sont possibles qui donnent lieu à la collecte des données requises. Par exemple, on peut utiliser un analyseur de spectre en mode maximal comme récepteur et le régler pour enregistrer le signal reçu sur une large gamme de fréquences tout en réglant pas par pas la fréquence d'entrée de la chambre sur la même gamme. Si le temps de palier à chaque fréquence est tel que le brasseur de l'enceinte réalise une révolution pour chacun des pas nécessaires pour faire réaliser une révolution au brasseur de la chambre, alors le nombre nécessaire d'échantillons est collecté à chaque fréquence.

## H.6 Documents de référence

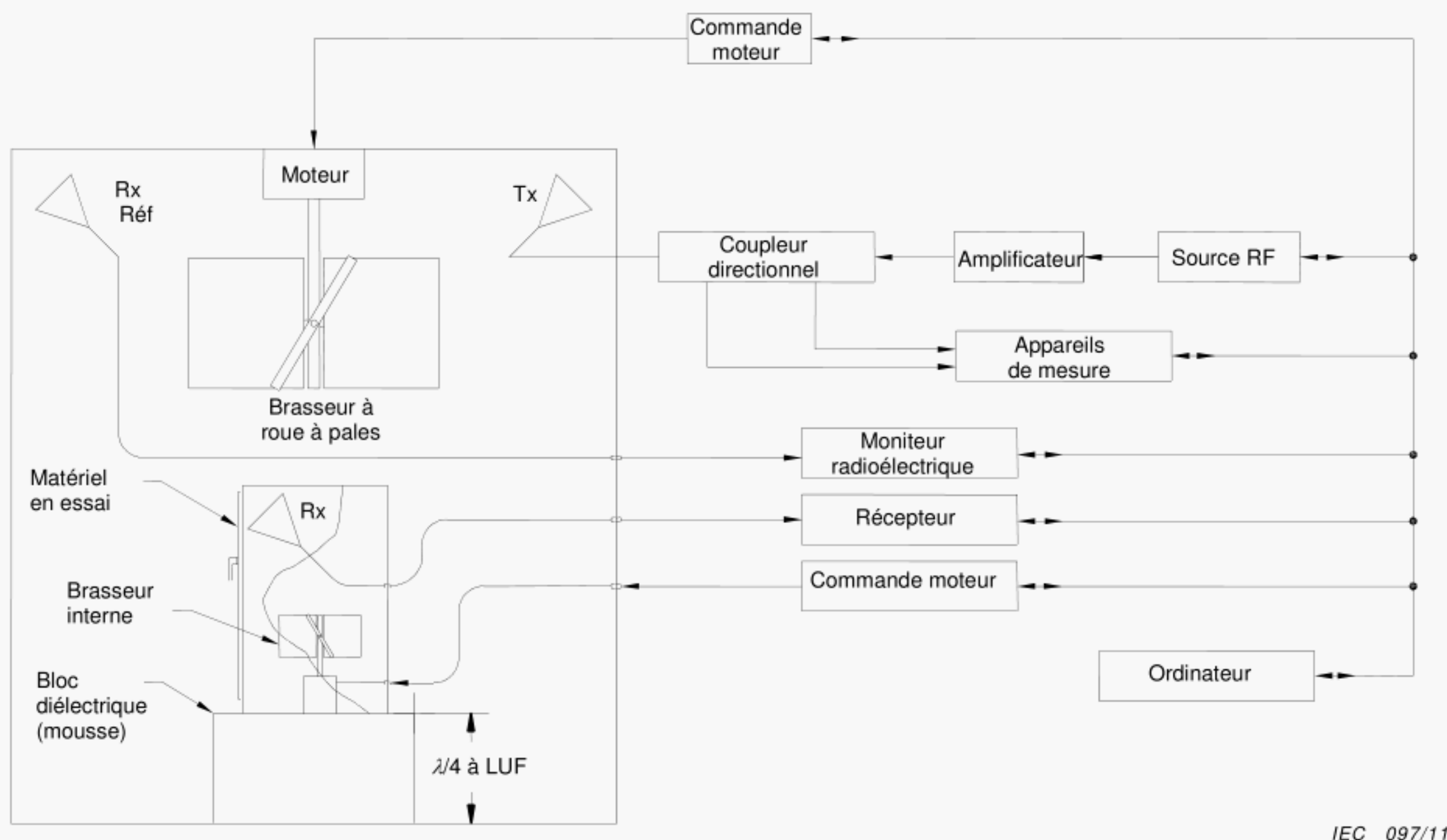
- [1] CEI 61726, *Câbles, cordons, connecteurs et composants hyperfréquence passifs – Mesure de l'atténuation d'écran par la méthode de la chambre réverbérante*
- [2] CEI 60169-1-3, *Connecteurs pour fréquences radioélectriques – Première partie: Prescriptions générales et méthodes de mesure – Section trois – Méthodes d'essai et de mesures électriques: Efficacité d'écran*
- [3] CEI 61000-5-7, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5-7: Guide d'installation et d'atténuation – Degrés de protection procurés par les enveloppes contre les perturbations électromagnétiques (Code EM)*
- [4] HATFIELD, MO. Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches. IEEE Transactions on EMC, August 1988, Vol. 30, No. 3, p. 229-238.
- [5] FREYER, GJ. and HATFIELD, MO. Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements, part I. IEEE Int. Symposium on EMC, Anaheim, CA, August 1992, p. 139-141.
- [6] HE, Y, MARVIN, AC and FLINTOFT, ID, A study of the field statistics in nested frequency-stirred reverberation chambers, URSI 29<sup>th</sup> General Assembly, Chicago, IL, August 2008.
- [7] HATFIELD, MO. and FREYER, GJ. Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements – part II. IEEE Int. Symposium on EMC, Anaheim, CA, August 1992, p.142-148.





CEI 2123/03

**Figure H.1 – Installation de l'enceinte d'essai type pour les essais d'enceinte de sol**



IEC 097/11

**Figure H.2 – Installation de l'enceinte d'essai type pour les essais d'enceintes montées sur banc**



## Annexe I (informative)

### Mesures du rendement d'antenne

#### I.1 Rendement d'antenne

Le rendement d'antenne est défini comme le rapport de la puissance totale rayonnée par une antenne sur la puissance résultante acceptée par l'antenne de l'émetteur connecté [1]<sup>10</sup>.

$$\eta_{\text{Antenne}} = \frac{P_{\text{rayonnée par l'antenne}}}{P_{\text{Puissance acceptée par l'antenne émise par l'émetteur}}} \quad (\text{I.1})$$

En pratique, le rendement d'antenne est défini comme le rapport de la puissance radioélectrique rayonnée par l'antenne sur la grandeur de la puissance radioélectrique délivrée aux bornes de l'antenne.

$$\eta_{\text{Antenne}} = \frac{P_{\text{rayonnée par l'antenne}}}{P_{\text{Entrée des bornes de l'antenne}}} \quad (\text{I.2})$$

Réciproquement, le rendement de réception est le même que le rendement de rayonnement. Le rendement d'antenne peut être exprimé en termes de résistance de rayonnement et de résistance de perte [2].

A partir des définitions ci-dessus, on voit qu'aucune antenne n'est efficace à 100 %. Toutes les antennes présentent une certaine perte. Ces pertes peuvent être attribuées aux pertes ohmiques, c'est-à-dire aux pertes de conversion (conduites sur rayonnées/rayonnées sur conduites) et aux pertes de transition (adaptateurs coaxiaux), etc. Noter que la désadaptation est considérée comme une caractéristique séparée d'une antenne et qu'elle ne fait pas partie du rendement de l'antenne.

Bien que le rendement constitue une caractéristique réelle d'une antenne, le rendement d'antenne n'est normalement pas mesuré au cours des caractérisations de routine de l'antenne. En fait, le rendement d'une antenne n'est pas facilement mesuré bien qu'il puisse être calculé à partir d'une simulation numérique de la distribution du courant traversant l'antenne. La plupart des bonnes antennes sont efficaces. Un cornet type du commerce à double stries convertit par exemple environ 95 % de l'énergie radioélectrique délivrée à ses bornes en champ rayonné. Une antenne log-périodique d'autre part convertit environ 75 % de l'énergie radioélectrique délivrée à ses bornes en champ rayonné [3].

Lorsqu'on effectue des mesures dans une chambre réverbérante, il est nécessaire de tenir compte du rendement d'antenne pour faire des estimations précises des caractéristiques de chambre comme le facteur de qualité de chambre «*Q*» et la constante de temps de la chambre  $\tau$ . Les valeurs de 95 % et 75 % utilisées dans cette spécification sont fondées sur l'expérience du National Institute of Standards and Technology (NIST), Electromagnetic Fields Division, Boulder, Colorado, USA. Dans la mesure où les valeurs réelles du rendement ne sont pas fournies avec les données du fabricant, il est nécessaire de faire des approximations pour améliorer la précision de caractérisation de chambre [3], [4]. Les rendements indiqués sont fondés sur les mesures réalisées par le NIST en utilisant plusieurs antennes cornet et log-périodiques, qui toutes ont inmanquablement montré des rendements proches des valeurs indiquées.

<sup>10</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article I.3. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



NOTE La désadaptation des antennes dépend, entre autres éléments, de l'impédance d'ondes de l'environnement et ne constitue pas une propriété intrinsèque de l'antenne. Il convient de tenir compte séparément de la désadaptation non incluse dans l'Equation (I.2).

## I.2 Mesure du rendement d'antenne

La chambre réverbérante constitue peut-être l'un des meilleurs moyens pour caractériser de manière expérimentale le rendement d'une antenne [5]. En caractérisant correctement une chambre réverbérante en utilisant une paire d'antennes bien caractérisées et en remplaçant une antenne de rendement inconnu, le rendement relatif de l'antenne inconnue peut être déterminé. Ce type de mesure nécessiterait une procédure d'essai approfondie pour déterminer le rendement à quelques pour cents près. Une telle procédure nécessiterait généralement un très grand nombre de mesures pour obtenir la précision nécessaire.

## I.3 Documents de référence

- [1] IEEE standard definitions of terms for antennas., " IEEE Std 145-1993, 21 Jun. 1993.
- [2] NEWMAN, EH., BOHLEY, P., and WALTER, CH. Two methods for the measurement of antenna efficiency *IEEE Trans. Antennas Propag.* Jul. 1975, vol. 23, no. 4, pp. 457-461.
- [3] LADBURY, JM., KOEPKE, GH. and CAMELL, DG. Evaluation of the NASA Langley Research Center mode-stirred chamber facility. *NIST Technical Note 1508*, January 1999.
- [4] JOHNSON, RH. and McRORY, JG. An improved small antenna radiation-efficiency measurement method. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Oct. 1998, vol. 40, no. 5, p. 40-48.
- [5] ROSENGREN, K., KILDAL, P-S., CARLSSON, C. and CARLSSON J. Characterization of Antennas for Mobile and Wireless Terminals in Reverberation Chambers: Improved Accuracy by Platform Stirring. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001,130, 6.



## Annexe J (informative)

### Evaluation directe des performances de réverbération en utilisant les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ

#### J.1 Vue d'ensemble

**J.1.1** Dans le domaine de la validation et des essais en chambres réverbérantes, un aspect important consiste à évaluer à quel point la chambre réelle est «proche» d'une chambre réverbérante idéale, à la fréquence de mesure. Afin de quantifier les performances de réverbération réelles, on peut analyser les données du brasseur, par exemple, en utilisant un essai approprié de bonne adaptation statistique. Un tel essai d'hypothèse évalue la désadaptation entre les fonctions mesurée et théorique (idéale) de distribution de champ ou de densité de puissance, à un niveau d'acceptation prédéfini. Ce niveau peut ne pas avoir une signification égale pour différents types d'essais de bonne adaptation [1]<sup>11</sup>, [2], [3] et, éventuellement, pour différentes chambres. En outre, les statistiques des composantes individuelles de champ ne donnent que des informations indirectes sur les grandeurs d'intérêt réel pour les champs réverbérants, c'est-à-dire uniformité de polarisation (isotropie de champ) ou uniformité spatiale (homogénéité de champ). Un essai de bonne adaptation donne ainsi une indication essentiellement qualitative des performances de brassage de cette chambre, et le résultat est souvent une mention non quantifiée de «bonne» ou «mauvaise» performance de réverbération.

**J.1.2** Une autre approche, quantitative cette fois, consiste à utiliser une métrique déterministe pour les performances de brassage, c'est-à-dire les coefficients d'anisotropie planaire et totale de champ, comme cela est expliqué ci-dessous, et qui expriment directement le degré d'isotropie et d'homogénéité de champ. Ceux-ci ne nécessitent pas par ailleurs l'utilisation des distributions statistiques des composantes rectangulaires individuelles du champ ou de la densité de puissance. Il s'agit d'une manière relativement rapide d'évaluer les performances du brasseur et de la chambre.

#### J.2 Coefficients d'anisotropie de champ

##### J.2.1 Définitions

Les coefficients d'anisotropie planaire et totale de champ  $A_{\alpha\beta}$  et  $A_{\text{tot}}$ , respectivement, sont définis par leurs moyennes de brassage comme mentionné en [4], [5], [6]:

$$\langle A_{\alpha\beta} \rangle = \left\langle \frac{(|E_\alpha|^2 / P_l) - (|E_\beta|^2 / P_l)}{(|E_\alpha|^2 / P_l) + (|E_\beta|^2 / P_l)} \right\rangle = \left\langle \frac{(P_\alpha / P_l) - (P_\beta / P_l)}{(P_\alpha / P_l) + (P_\beta / P_l)} \right\rangle \quad (\text{J.1})$$

$$\langle A_{\text{tot}} \rangle = \left\langle \sqrt{[A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2] / 3} \right\rangle \quad (\text{J.2})$$

où

$|E_{\alpha,\beta}|$  et  $P_{\alpha,\beta}$  représentent respectivement, le champ et la densité de puissance reçus mesurés, de la composante rectangulaire arbitraire  $\alpha$  ou  $\beta = x, y, z$  pour un état donné du brasseur (position)  $\tau$ ;

<sup>11</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article J.6. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



- $P_i$  est la puissance d'entrée résultante (c'est-à-dire incidente moins réfléchie) injectée dans la chambre à  $\tau$  pour  $\alpha$  ou  $\beta$  mesurés; et
- $\langle \cdot \rangle$  indique la moyenne de brassage (c'est-à-dire d'ensemble) sur toutes les valeurs  $\tau$ , comme défini en B.1.2 (10).

Les définitions pour les Equations (J.1) et (J.2) ne sont pas affectées par  $\langle P_i \rangle$ , mais elles dépendent des variations de  $P_i$  avec  $\tau$ . Physiquement, la définition de  $A_{\text{tot}}$  comme moyenne efficace des  $A_{\alpha\beta}$  individuels donne, en un paramètre unique, une mesure pour la polarisation de la direction moyenne de polarisation du champ électrique qui existe lorsque cette direction moyenne est vue en (projetée sur) trois plans orthogonaux.

## J.2.2 Procédure d'évaluation

### J.2.2.1 La procédure est la suivante:

- (1) Le nombre minimal nécessaire d'états non corrélés  $N$  du brasseur est décidé d'abord, comme indiqué à l'Article A.3. Ceci est effectué conformément aux spécifications de l'utilisateur pour le niveau d'incertitude maximal acceptable de la caractérisation des coefficients d'anisotropie de champ.

NOTE 1 Pour une «bonne» qualité de brassage, l'amplitude de  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  est du même ordre que son écart type associé. Ce dernier correspond aux valeurs moyennes pour «bonne» qualité de brassage indiquées au Tableau J.1 (ce tableau sert de «guide de bonne pratique» pour la conception de chambres et de brasseurs). Il est recommandé de choisir une valeur de  $N$  supérieure ou égale à 100 pour l'évaluation d'une chambre unique (au moins  $N = 30$  pour obtenir des résultats significatifs) et  $N = 300$  pour des comparaisons entre plusieurs chambres. La valeur minimale de  $N$  peut être déterminée *a posteriori* à partir d'un échantillon important en suivant la procédure indiquée en J.2.4.1. Note d'avertissement: en général, plus la valeur choisie de  $N$  est faible, moins les résultats sont significatifs pour  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , en particulier lorsque  $N < 30$ .

- (2) Les amplitudes de champ  $|E_\alpha(\tau)|$  ou les densités de puissance  $P_\alpha(\tau)$ , avec  $\alpha = x, y, z$ , sont mesurées pour les  $N$  états du brasseur  $\tau$ , les fréquences choisies  $f$  et les emplacements d'antenne de réception  $r$  à l'intérieur de la chambre.

NOTE 2 Les procédures et les critères de mesure sont indiqués aux étapes (1) à (8) de B.1.2, sauf que toutes les valeurs d'amplitude (mesurées pour chaque  $\tau$ ) sont maintenant enregistrées; pas seulement les valeurs maximales et moyennes. Il convient que pour les sondes de champs à trois axes, les valeurs individuelles lues des éléments de sonde (dipôles)  $x, y, z$  soient utilisées. Pour les mesures des dipôles, des antennes cornets ou des guides d'ondes, trois orientations orthogonales de l'ouverture sont générées en réorientant l'antenne ou le guide d'onde entre les mesures. Il convient que pour chaque orientation, l'ouverture soit centrée autour du même point central  $r$ .

- (3) Pour une précision accrue,  $P_i$  doit être mesuré pour chaque état différent du brasseur; dans le cas contraire, une valeur moyenne d'au moins 10 états non corrélés du brasseur doit être prise pour obtenir une valeur moyenne nominale  $\langle P_i \rangle$  pour remplacer  $P_i$ . La mesure de  $P_i$  doit être répétée pour différentes fréquences et différents emplacements d'antenne.

NOTE 3 Lorsque les mesures de  $P_i(\tau)$  ne sont pas réalisées, il convient qu'une estimation de  $\langle P_i \rangle$  soit indiquée avec la liste finale des valeurs pour  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ . L'importance de  $P_i$  dans les Equations (J.1) et (J.2) diminue pour que la qualité de la réverbération augmente.

- (4) Pour chaque état  $\tau$  et fréquence fixe et emplacement d'antenne, calculer les coefficients:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{(|E_\alpha(\tau)|^2 / P_i) - (|E_\beta(\tau)|^2 / P_i)}{(|E_\alpha(\tau)|^2 / P_i) + (|E_\beta(\tau)|^2 / P_i)} \quad \text{ou} \quad A_{\alpha\beta} = \frac{(P_\alpha(\tau) / P_i) - (P_\beta(\tau) / P_i)}{(P_\alpha(\tau) / P_i) + (P_\beta(\tau) / P_i)} \quad (\text{J.3})$$

et

$$A_{\text{tot}} = \sqrt{[A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2] / 3} \quad (\text{J.4})$$

où  $P_i$  indique  $P_i(\tau)$  ou  $\langle P_i \rangle$ , conformément à l'étape (3).

- (5) Les anisotropies moyennées de brassage, c'est-à-dire, planaires moyennées en fonction de  $\tau$  et du champ total  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , sont calculées comme dans les Equations (J.1) et (J.2), à la fréquence et à l'emplacement d'antenne choisis.
- (6) Répéter les étapes (2) à (5) pour chaque fréquence concernée.



- (7) Répéter les étapes (2) à (5) pour chaque emplacement d'antenne concerné. Une valeur volumétrique moyenne doit être indiquée en plus, à partir du calcul de la moyenne arithmétique des moyennes individuelles de brassage de  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  sur les trois ou huit emplacements d'antenne ou de champ, pour chaque fréquence, conformément à la procédure en B.1.2 (10) (b).

La procédure ci-dessus est pour le fonctionnement en mode pas à pas, mais elle peut également être utilisée pour le fonctionnement en mode continu, sous réserve de la prise en compte des éléments de l'Annexe C. Lorsque la moyenne de brassage est considérable, on doit appliquer la moyenne locale inverse dans le domaine temporel (du brassage) en premier lieu [5], [7], [8] (voir également J.2.2.2 et J.5.2).

**J.2.2.2** Lorsque cela est possible, les mesures doivent être réalisées avec des antennes ou des sondes de champ électriquement petites (longueur type inférieure à un tiers de longueur d'onde), parce que la moyenne locale affecte les variations de champ mesurées (performance de réverbération) en comparaison avec les variations physiques. Sinon, l'effet de moyenne spatiale du capteur sur les valeurs mesurées de  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  doit être pris en compte en rééchantillonnant les valeurs mesurées en valeurs de point idéalisées.

### J.2.3 Distributions

**J.2.3.1** La comparaison entre distributions théoriques et mesurées de  $A_{\alpha\beta}$  et  $A_{\text{tot}}$  est optionnelle, en fournissant une mesure essentiellement qualitative entre isotropie et homogénéité de champ idéale et réaliste. Les distributions théoriques et mesurées de  $A_{\alpha\beta}$  et  $A_{\text{tot}}$  (voir J.5.1) convergent selon une structure similaire comme les distributions correspondantes de l'amplitude de champ ou de la densité de puissance la plus fondamentale, mais elles sont plus utiles en pratique.

**J.2.3.2** La Figure J.1 montre les fonctions de distribution cumulatives types (CDF) pour  $A_{\alpha\beta}$  et  $A_{\text{tot}}$  dans une chambre réverbérante bien brassée. Bien que les valeurs  $A_{\alpha\beta}$  individuelles soient proches des caractéristiques théoriques idéales,  $A_{\text{tot}}$  est plus sensible aux imperfections de chambre. La Figure J.2 montre les distributions correspondantes pour les données du brasseur prises dans une chambre relativement mal brassée.

### J.2.4 Dépendance par rapport à la taille de l'échantillon

**J.2.4.1** Dans une chambre réverbérante à brassage de modes continu idéale, les valeurs de  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  tendent vers zéro lorsque le nombre d'états non corrélés du brasseur devient arbitrairement élevé. Dans les chambres mal brassées,  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle \approx A_{\alpha\beta}$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle \approx A_{\text{tot}}$  pour tous les états  $\tau$  du brasseur et, dans la moyenne,  $\text{std}(A_{\alpha\beta}) \ll \langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\text{std}(A_{\text{tot}}) \ll \langle A_{\text{tot}} \rangle$ , où  $\text{std}(\cdot)$  est l'écart type par rapport à  $\tau$ . En particulier, une valeur parasite «nulle» pour  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ , causée par un choix impropre de  $\alpha$  et  $\beta$  tel que  $|E_\alpha| \approx |E_\beta|$  pour toutes les valeurs de  $\tau$ , peut intervenir exceptionnellement, ou même  $\langle A_{\text{tot}} \rangle \approx A_{\text{tot}} \approx 0$  pour un choix particulier de  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  tel que  $|E_\alpha| \approx |E_\beta| \approx |E_\gamma|$  pour toutes les valeurs de  $\tau$ . Ceci correspond au cas singulier où la direction de la polarisation de champ est fixée et est exactement à angles égaux des directions  $\alpha, \beta$ , et  $\gamma$  pour tous les états du brasseur. Dans de tels cas,  $\text{std}(A_{\alpha\beta}) \approx \langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\text{std}(A_{\text{tot}}) \approx \langle A_{\text{tot}} \rangle$ , comme pour le cas d'une chambre bien brassée. Par conséquent, des informations complémentaires sont ensuite nécessaires pour détecter un tel cas. Ainsi, si  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  ou  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  est inférieur à  $-10$  dB, une seconde mesure est réalisée pour différentes orientations des trois valeurs  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  pour le ou les capteurs. Les valeurs parasites «nulles» peuvent être plus facilement détectées en calculant  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  pour différents sous-échantillons de taille  $M$  ( $\leq N$ ), pris de la séquence originale du brasseur et en analysant  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  en fonction de  $M$ . Une valeur parasite «nulle» pour  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  se présente ensuite comme une valeur qui ne diminue pas, en moyenne, en fonction de l'augmentation de  $M$ . Dans un tel cas, il convient que  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  soient remises à la valeur 1, correspondant à un champ purement anisotrope.

**J.2.4.2** La Figure J.3 représente des tracés types de  $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , avec les valeurs absolues de leur écart type obtenues en utilisant un processus empirique ré-échantillonné et en faisant les moyennes, en fonction de la taille d'échantillon. Leurs valeurs subissent une



baisse, en moyenne, avec les valeurs de  $M$  en augmentation. Des valeurs raisonnables pour  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  de l'ordre de  $-10$  dB,  $-15$  dB et  $-20$  dB à  $N = 300$  peuvent être considérées respectivement comme «modérées», «bonnes» et «excellentes» dans la plupart des applications. L'effort de brassage complémentaire, c'est-à-dire, l'investissement nécessaire pour réduire encore les valeurs faibles  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  en augmentant  $N$ , tend à augmenter de manière exponentielle et il convient qu'il soit soigneusement pris en compte.

Une taille d'échantillon minimale appropriée peut être choisie comme la valeur minimale de  $M$  pour laquelle  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  restent dans les limites de l'intervalle de confiance choisi pour ces statistiques. Noter qu'à la Figure J.3, des excursions de  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  ou  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  au-dessus du niveau défini par un écart type pour  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  ou  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  sont bien plus sévères à l'extrémité  $M$  faible par opposition à l'extrémité  $M$  élevée en raison de l'échelle logarithmique. Dans cet exemple, le nombre minimal d'états du brasseur est d'environ 10 lorsque le niveau d'incertitude est choisi comme un écart type.

**J.2.4.3** Pour les besoins de comparaison entre plusieurs chambres et techniques de brassage, on fait la liste de l'expression pour une courbe d'adaptation ou, sinon, des valeurs choisies pour les enveloppes de  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  à  $N = 10, 30, 100, 300$ , etc. points échantillons indépendants équivalents. Le nombre de points échantillons indépendants équivalents  $N$  peut être défini par le critère de dé-corrélation  $\rho^{-1}(e^{-1})$ , à savoir, correspondant au sous-échantillon le plus important  $N$  de  $M$  pour lequel  $|\rho(\tau \neq 0)| \leq 1/e$  pour la fonction d'auto-corrélation de données  $\rho(\tau)$  de l'amplitude de champ ou de densité de puissance mesurées. En ne retirant pas cette auto-corrélation de données, c'est-à-dire en permettant un sous-échantillonnage plus dense, l'écart type sur  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  peut être réduit, mais les valeurs moyennes elles-mêmes restent non affectées.

Le Tableau J.1 donne la liste des valeurs pour  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  qui définissent une région seuil pour des performances de brassage «moyenne» et «bonne». Le point à noter est que pour  $N \leq 10$ , la moyenne et l'écart type des coefficients d'anisotropie de champ restent toujours relativement élevés, quelle que soit la performance de brassage pour une valeur de  $N$  plus élevée.

**J.2.4.4** Dans les cas où l'on ne peut pas évaluer individuellement trois directions orthogonales pour le champ mesuré ou la densité de puissance, en un emplacement unique à l'intérieur de la chambre, un seul coefficient d'anisotropie de champ planaire peut être évalué à partir de deux mesures obtenues pour des directions mutuellement perpendiculaires du capteur de réception. On doit veiller à éviter les valeurs parasites «nulles» comme cela est expliqué en J.2.4.1.

### J.3 Coefficients d'inhomogénéité de champ

#### J.3.1 Définitions

Des coefficients similaires sont définis pour l'inhomogénéité de champ. Un choix convenable pour de tels coefficients, définissant l'inhomogénéité statistique pour la direction de polarisation  $\alpha = x, y, z$  ou pour le champ total ( $\alpha = t$ ) entre deux emplacements de cavité  $r_1$  et  $r_2$  est:

$$\langle I_{\alpha}(r_1, r_2) \rangle = \frac{\langle (|E_{\alpha}(r_1)|^2 / P_i) - (|E_{\alpha}(r_2)|^2 / P_i) \rangle}{\langle (|E_{\alpha}(r_1)|^2 / P_i) + (|E_{\alpha}(r_2)|^2 / P_i) \rangle} = \frac{\langle (P_{\alpha}(r_1) / P_i) - (P_{\alpha}(r_2) / P_i) \rangle}{\langle (P_{\alpha}(r_1) / P_i) + (P_{\alpha}(r_2) / P_i) \rangle} \quad (\text{J.5})$$

$$\langle I_{\text{tot}}(r_1, r_2) \rangle = \left\langle \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2} / 3 \right\rangle \quad (\text{J.6})$$

#### J.3.2 Procédure d'évaluation

En général, les mêmes procédures et commentaires qu'en J.2.2 s'appliquent.



Les fluctuations de  $P_i$  pour un état donné sont généralement bien plus faibles lorsqu'on déplace un capteur en deux emplacements différents comparativement aux fluctuations observées pour un emplacement de chambre donné et en faisant varier les états du brasseur (voir J.2.2.1). Dans le cas de capteurs multiples, ces fluctuations spatiales de  $P_i$  n'existent pas.

Il convient de veiller à éviter le choix des emplacements  $r_1$  et  $r_2$  qui sont séparés par un nombre entier de demi-longueurs d'ondes pour un signal d'excitation d'onde entretenue (CW), ou des distances excessivement faibles, bien plus faibles que cette longueur d'onde pour laquelle les champs sont hautement corrélés. Une distance minimale correspondant à une longueur d'onde est recommandée. La procédure peut être répétée pour des emplacements multiples à partir desquels une valeur moyenne peut ensuite être déduite (voir Annexe B).

### J.3.3 Distributions

La gamme et la distribution de  $I_\alpha$  et  $I_{\text{tot}}$  sont comparables à celles de  $A_{\alpha\beta}$  et  $A_{\text{tot}}$  (voir J.2.2).

### J.3.4 Dépendance par rapport à la taille de l'échantillon

Des considérations similaires à celles pour  $A_{\alpha\beta}$  et  $A_{\text{tot}}$  s'appliquent (voir J.2.4).

## J.4 Anisotropie de champ par rapport au défaut d'homogénéité de champ

Il est généralement suffisant d'étudier soit  $A_{\alpha\beta}$ ,  $A_{\text{tot}}$  soit  $I_\alpha$ ,  $I_{\text{tot}}$  dans la mesure où les coefficients d'anisotropie et d'homogénéité de champ sont des statistiques fortement corrélées [4]. Les distributions de  $I_\alpha$ ,  $I_{\text{tot}}$ , cependant, sont généralement plus sensibles aux imperfections du brassage de modes. Il peut être démontré que l'isotropie statistique implique une homogénéité statistique, la réciproque n'étant toutefois pas nécessairement vraie. Par conséquent, l'évaluation de l'anisotropie de champ constitue l'essai le plus sévère des deux.

## J.5 Extensions

### J.5.1 Distribution de $A_{\alpha\beta}$

Les coefficients d'anisotropie de champ planaire ponctuels  $A_{\alpha\beta}$  sont des grandeurs auto-normalisées, en prenant des valeurs entre  $-1$  et  $+1$  pour chaque état du brasseur, quelle que soit la valeur de  $P_i$ . Pour des conditions de réverbération parfaites (c'est-à-dire isotropie de champ statistique idéale), la variable aléatoire  $A_{\alpha\beta}$  peut être représentée pour figurer une distribution uniforme (rectangulaire), dont la fonction de distribution cumulative (CDF) théorique est donnée par:

$$F_{A_{\alpha\beta}}(a_{\alpha\beta}) = \frac{(1 + a_{\alpha\beta})}{2} \quad (\text{J.7})$$

c'est-à-dire, une ligne droite de pente unité. Si la fonction mesurée est de manière prédominante inférieure ou supérieure à la fonction théorique, alors ceci est indicatif d'une tendance de la polarisation de champ statistique, respectivement vers la direction  $\alpha$  ou vers la direction  $\beta$  dans le plan ( $o\alpha$ ,  $o\beta$ ). La distance maximale  $D_N$  entre les fonctions mesurée et théorique (statistique de Kolmogorov—Smirnov) sert comme mesure indirecte pour l'anisotropie de champ [1].

### J.5.2 Nombre minimal d'échantillons

Pour déterminer le nombre de positions du brasseur (taille d'échantillon) nécessaires pour obtenir un niveau *a priori* prédéterminé d'anisotropie de champ, on répète la procédure ci-dessus pour des nombres différents d'états du brasseur (tailles d'échantillon)  $M$  et on peut tracer  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  correspondants en fonction de  $M$ . Ceci peut être fait simplement en



prenant un sous-ensemble de  $M$  points de données à partir d'un seul grand balayage du brasseur. On détermine l'enveloppe  $X'$  des valeurs  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  et  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$  mesurées à partir de:

$$X'(\tau_i) = \sqrt{X^2(\tau_i) + [H(X(\tau_i))]^2} \quad (\text{J.8})$$

où  $X$  représente  $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$  ou  $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ , avec

$$H(X(\tau_i)) = \pi^{-1} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} \left[ \frac{X(\tau_i - \tau_j)}{\tau_j} \right] \Delta \tau \quad (\text{J.9})$$

Sinon, on peut appliquer un filtre de moyenne mobile local plus simple à l'échantillon mesuré, lorsque la moyenne se fait sur une longueur inférieure à 3 % de la longueur maximale de la séquence de brasseur, c'est-à-dire, en remplaçant la séquence originale  $X(\tau_i)$  par:

$$X'(\tau_i) = L^{-1} \sum_{j=i-L/2}^{i+L/2} X(\tau_j) \quad (\text{J.10})$$

avec  $L/M \leq 0,03$ .

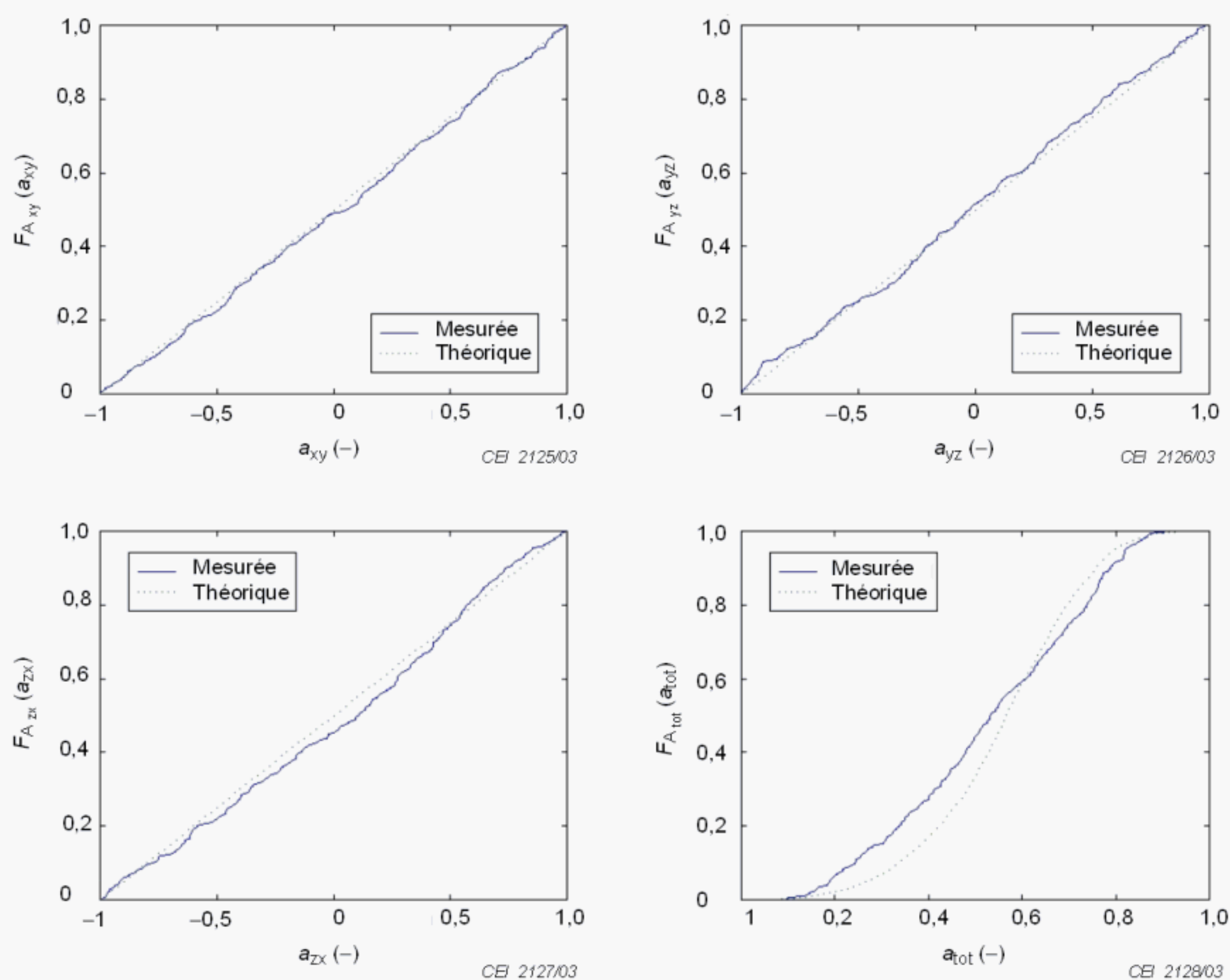
**Tableau J.1 – Valeurs types pour coefficients d'anisotropie de champ totale pour une qualité de réverbération «moyenne» et «bonne»**

	$N = 10$	$N = 30$	$N = 100$	$N = 300$
Qualité de brassage «moyenne»	–2,5 dB	–5 dB	–7,5 dB	–10 dB
Qualité de brassage «bonne»	–5 dB	–10 dB	–12,5 dB	–15 dB

## J.6 Documents de référence

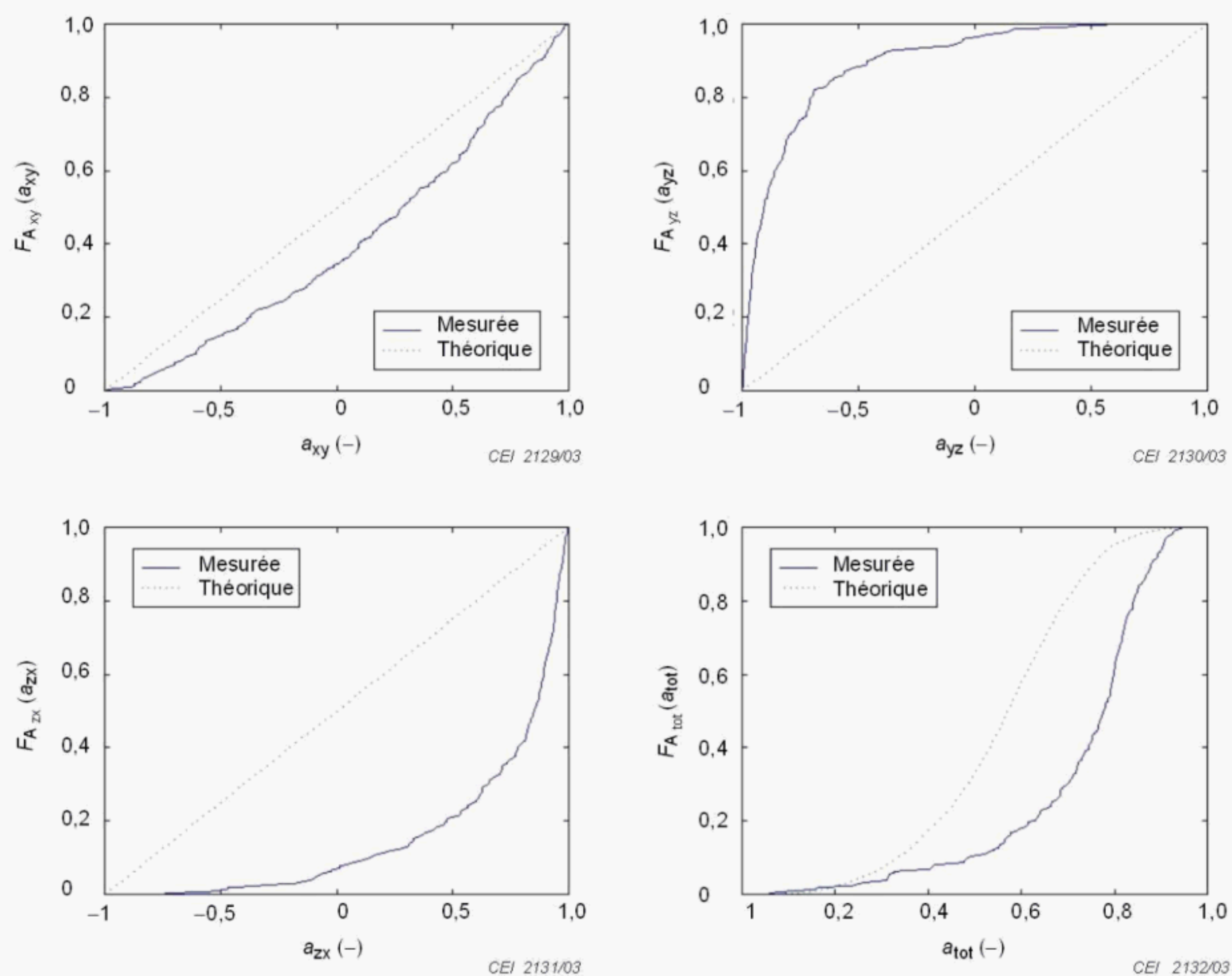
- [1] ARNAUT, LR. and WEST, PD. Electric field probe measurements in the NPL untuned stadium reverberation chamber. *NPL Report CETM 13* (Sept. 1999), 13, Appendix H.
- [2] ARNAUT, LR. Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers. *IEEE Trans. EMC*, vol. 44, no. 2, pp. 442—457 (2002).
- [3] LUNDÉN, O. and BÄCKSTRÖM, M. Stirrer Efficiency in FOA Reverberation Chambers. Evaluation of Correlation Coefficients and Chi-Squared Tests. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, USA, August 21 – 25, 2000, p. 11-16.
- [4] ARNAUT, LR. and WEST, PD. Evaluation of the NPL untuned stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques. *NPL Technical Report CEM 11* (Aug 1998).





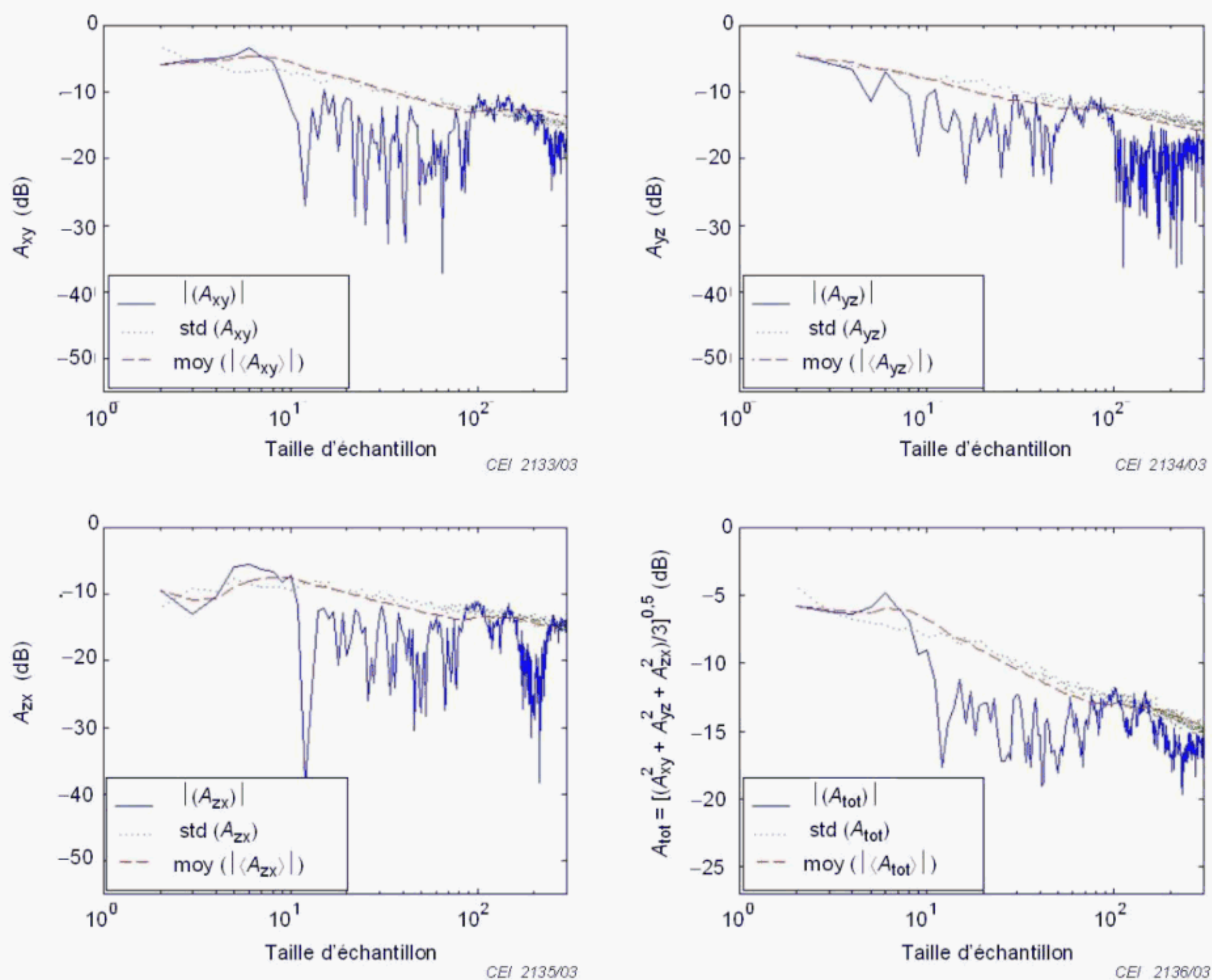
**Figure J.1 – Distributions théoriques et types mesurées pour les coefficients d'anisotropie de champ dans une chambre bien brassée**





**Figure J.2 – Distributions théoriques et types mesurées pour les coefficients d'anisotropie de champ dans une chambre mal brassée**





**Figure J.3 – Valeurs mesurées types pour les coefficients d'anisotropie de champ en fonction de  $N$  dans une chambre bien brassée**



## Annexe K (informative)

### Incertitude de mesure pour la validation de la chambre – Essais d'émissions et d'immunité

#### K.1 Généralités

##### K.1.1 Incertitude de mesure en normalisation

Les méthodologies normalisées pour l'expression et l'évaluation de l'incertitude de mesure générale, qui ne se limite pas à la CEM, sont traitées en [1]<sup>12</sup>. Les considérations relatives à l'évaluation de l'incertitude de mesure dans les méthodes d'essai CEM sont spécifiées en [2] et [3]. Une prise en compte plus détaillée de l'expression de l'incertitude de mesure pour les chambres réverbérantes est donnée en [4].

##### K.1.2 Incertitude de mesure dans les chambres réverbérantes par rapport à d'autres méthodes d'essai CEM alternatives

Par comparaison à l'incertitude de mesure pour d'autres méthodes d'essai CEM à ondes planes alternatives, certaines contributions aux prévisions relatives à l'incertitude de mesure (par exemple, imperfections de chambre, aspects ambiants et environnementaux, effets d'antenne, instruments, etc.) s'appliquent également aux chambres réverbérantes. D'autres contributions (par exemple, disposition des câbles, orientation et distance entre le matériel en essai et l'antenne, tolérance de position, etc.) sont moins importantes, ou pas importantes du tout, dans une chambre réverbérante, tandis que l'incertitude due à la nature intrinsèquement aléatoire du champ dans une chambre réverbérante constitue une contribution supplémentaire importante à l'incertitude de mesure globale unique pour les chambres réverbérantes.

##### K.1.3 Incertitude de champ intrinsèque par rapport à l'incertitude des instruments de mesure

Un calcul détaillé des prévisions complètes relatives à l'incertitude de mesure [2], [3] ne relève pas du domaine d'application de la présente annexe, qui traite uniquement des contributions à l'incertitude de mesure qui sont spécifiques à une chambre réverbérante. La contribution supplémentaire de l'incertitude de champ intrinsèque, due à la nature statistique du champ à l'intérieur d'une chambre réverbérante, est traitée ici. Seules des conditions de fonctionnement théoriques (régime en sur-mode) se prêtent à une évaluation traçable de l'incertitude de mesure [4]. Le traitement applicable ici est limité à ces conditions. L'effet des imperfections d'un champ aléatoire sur son incertitude et ses intervalles de confiance est traité en A.2.2.

Le champ et la densité de puissance à l'intérieur d'une chambre réverbérante sont des grandeurs aléatoires, en raison de la grande sensibilité du champ de cavité aux changements des limites ou de l'excitation dans l'espace ou le temps. Pour des conditions de fonctionnement types (à l'exclusion des chambres avec un facteur de qualité excessivement élevé, telles que les chambres en aluminium soudées), l'incertitude intrinsèque du champ ou de la puissance domine l'incertitude des instruments de mesure par un ou plusieurs ordres d'amplitude. Afin de comparer les contributions relatives de l'incertitude des instruments de mesure et de l'incertitude de champ intrinsèque à l'incertitude de mesure globale à une fréquence donnée,  $f$ , l'écart type de la composante rectangulaire (à axe unique) de la composante cohérente ou en quadrature du champ électrique résultant de l'incertitude de champ intrinsèque est donné par

<sup>12</sup> Les valeurs entre crochets font référence à l'Article K.4. Les documents de référence sont à la fin de cette annexe.



$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{\eta_{Tx} Q(f)}{12\pi \varepsilon_0 f V(f)}} \langle P_T \rangle \quad (K.1)$$

où

- $\varepsilon_0$  est la permittivité de l'espace libre ( $\approx 8,85 \times 10^{-12}$  F m<sup>-1</sup>);
- $\eta_{Tx}$  est le rendement de l'antenne d'émission;
- $Q(f)$  est le facteur de qualité de la chambre à la fréquence  $f$ ;
- $f$  est la fréquence de fonctionnement (en Hz);
- $V(f)$  est le volume de travail de la chambre à la fréquence  $f$  (en m<sup>3</sup>);
- $\langle P_T \rangle$  est la puissance émise moyenne sur toutes les positions du brasseur (en W).

L'écart type de la densité de puissance et l'amplitude de champ sont  $2\sigma^2/\eta_0$  et  $0,655 \sigma$ , respectivement, où  $\eta_0$  est l'impédance intrinsèque de l'espace libre (377 Ω). L'incertitude de champ intrinsèque dépend principalement du nombre d'échantillons indépendants que l'on choisit de générer dans le processus de validation de la chambre ou dans le cadre des essais CEM. L'incertitude de champ intrinsèque diminue de manière inversement proportionnelle à la racine carrée de ce nombre (voir discussion en A.4.2 et A.4.3). Cette incertitude est également influencée par le nombre maximal d'échantillons indépendants qu'un brasseur de modes est capable de générer dans cette chambre réverbérante. En général, le caractère fini de ce nombre maximal entraîne une réduction de l'incertitude de mesure. Pour les besoins de la présente annexe, il est supposé que ce nombre maximal est infini, représentant le scénario le plus défavorable qui serait produit à des fréquences arbitrairement élevées.

Il est possible de réduire l'incertitude de champ intrinsèque par l'augmentation du nombre de brasseurs de modes, ou des mécanismes de brassage afin de permettre un balayage ou un moyennage supplémentaire. Certains aspects et résultats sont indiqués en [4]. Dans le cas présent, seul un brasseur de modes mécanique est pris en considération, sans balayage spatial ou en fréquence.

## K.2 Emissions

Pour les mesures des émissions, la grandeur concernée principale type est la densité de puissance rayonnée émise moyenne, intégrée dans toutes les directions spatiales, ainsi que la propagation et la polarisation. Parfois, la densité de puissance maximale, ou l'intensité de champ (moyenne ou maximale) représente la grandeur concernée pouvant être déduite de la puissance émise mesurée.

Une méthode de substitution [2] permet d'associer la valeur moyenne de la puissance totale émise par un matériel en essai à sa puissance reçue moyenne  $\langle P_{Rx} \rangle$  à l'intérieur d'une chambre réverbérante idéale sous la forme

$$\langle P_{Tx} \rangle = CLF \frac{\langle P_{Rx} \rangle}{\langle P_{Rx,ref} \rangle} \langle P_{Tx,ref} \rangle \quad (K.2)$$

où

- $CLF$  est le facteur de charge du matériel en essai pour la chambre à la fréquence  $f$  (voir Annexe B);
- $P_{Tx, ref}$  est la puissance émise dans la chambre non soumise à une charge (c'est-à-dire sans matériel en essai) à  $N$  positions du brasseur;
- $P_{Rx,ref}$  est la puissance reçue dans la chambre non soumise à une charge à  $N$  positions du brasseur;



$P_{Tx}$  est la puissance reçue dans la chambre avec le matériel en essai à  $N$  positions du brasseur.

NOTE Il n'est pas nécessaire que les positions du brasseur soient statistiquement indépendantes pour estimer la puissance moyenne  $\langle P_{Tx} \rangle$ . Cependant, des échantillons indépendants sont nécessaires pour l'estimation de l'incertitude de mesure pour  $P_{Tx}$ .

La valeur moyenne d'échantillon pour  $N$  valeurs d'échantillon de la puissance reçue  $P_{Rx,1}, \dots, P_{Rx,N}$  est

$$\text{moy}(P_{Rx}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{Rx,i} \quad (\text{K.3})$$

Pour  $N$  positions du brasseur statistiquement indépendantes, l'écart type de la valeur moyenne est

$$\sigma_{\text{Moy}(P_{Rx})} = \frac{\sigma_{P_{Rx}}}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \langle P_{Rx} \rangle]^2}}{N} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \text{moy}(P_{Rx})]^2}{N(N-1)}} \quad (\text{K.4})$$

Sur la base de (2) et (3), les estimations d'ensemble sont

$$\langle P_{Rx} \rangle \approx \text{moy}(P_{Rx}), \quad \sigma_{P_{Rx}} \approx \sigma_{\text{Moy}(P_{Rx})} \cdot \sqrt{N} \quad (\text{K.5})$$

Pour des valeurs élevées de  $N$ ,  $\langle P_{Rx} \rangle$  est soumis à une distribution approximativement normale, avec un intervalle de confiance à 95 %, donné par

$$[\text{moy}(P_{Rx}) - 1,96 \sigma_{\text{Moy}(P_{Rx})}, \text{moy}(P_{Rx}) + 1,96 \sigma_{\text{Moy}(P_{Rx})}] \quad (\text{K.6})$$

Lorsque  $N < 30$ , l'intervalle de confiance a une largeur comparable, mais présente en revanche, un décalage ascendant en comparaison du calcul approché normal l'Equation (K.6) [4].

Aux fréquences pour lesquelles le critère d'uniformité de champ est satisfait, l'intervalle de confiance correspondant pour  $\langle P_{Tx} \rangle$  est

$$[\text{moy}(P_{Tx}) - 1,96 \sigma_{\text{Moy}(P_{Tx})}, \text{moy}(P_{Tx}) + 1,96 \sigma_{\text{Moy}(P_{Tx})}] \quad (\text{K.7})$$

avec

$$\sigma_{\text{Moy}(P_{Tx})} \approx \frac{16\pi^2 V(f) f^3}{c^3 \eta_{Rx} Q(f)} \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \text{moy}(P_{Rx})]^2}{N(N-1)}} \quad (\text{K.8})$$

où

$c$  est la vitesse de la lumière [ $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ];

$Q(f)$  est le facteur de qualité (adimensionnel) de la chambre à la fréquence  $f$ ;

$\eta_{Rx}$  est le rendement de rayonnement de l'antenne de réception au cours de la mesure des émissions (adimensionnel);

$V(f)$  est le volume de travail de la chambre à la fréquence  $f$  (en  $\text{m}^3$ );



L'estimation (7) pose comme hypothèse que l'incertitude de l'estimation fondée sur la mesure de  $Q$  est infiniment petit par rapport à  $\sigma_{\text{Moy}(P_{\text{Rx}})}$ . Dans le cas contraire, l'Equation (K.8) est généralisée sous la forme

$$\sigma_{\text{Moy}(P_{\text{Tx}})} \approx \sqrt{\left[ \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3 \eta_{\text{Rx}} \text{moy}(Q)} \sigma_{\text{Moy}(P_{\text{Rx}})} \right]^2 + \sigma_{\text{Moy}(Q)}^2} \quad (\text{K.9})$$

où

$$\text{moy}(Q) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i = \frac{16\pi^2 V}{M \eta_{\text{Rx}} \lambda^3} \sum_{i=1}^M \frac{\langle P_{\text{Rx}} \rangle_i}{\langle P_{\text{Tx}} \rangle_i} \quad (\text{K.10})$$

$$\sigma_{\text{Moy}(Q)} = \frac{\sigma_Q}{\sqrt{M}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M [Q_i - \langle Q \rangle]^2}}{M} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [Q_i - \text{moy}(Q)]^2}{M(M-1)}} \quad (\text{K.11})$$

sont obtenus par évaluation de  $Q$  à  $M$  emplacements différents de l'antenne de réception qui sont espacés au moins d'une demi-longueur d'onde les uns par rapport aux autres. Dans le cas présent,  $\text{moy}(P_{\text{Rx}})$  est calculée sur la base de  $N \times M$  valeurs mesurées au cours de la validation de la chambre, c'est-à-dire que  $N$  et  $N-1$  dans les Equations (K.3) et (K.4) sont remplacées par  $N \times M$  et  $(N - (-1)) \times (M - (-1))$ , respectivement, avec  $N, M > 1$ .

Pour une chambre suffisamment réverbérante et sous réserve que la source d'émission ne charge pas la chambre ( $CVF = 1$ ),  $\sigma_{\text{Moy}(P_{\text{Tx}})}$  peut être estimée à partir des mesures du paramètre  $S_{21}$  entre une paire d'antennes d'émission-réception, ou de la mesure de la puissance reçue pour une puissance d'entrée de référence connue, sous la forme [4]

$$\sigma_{\text{Moy}(P_{\text{Tx}})} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[ 1 + \left( \frac{\text{moy}(P_{\text{Rx}})}{\sigma_{P_{\text{Rx}}}} \right)^2 - 8 \left( \frac{\langle |S_{21}|^2 \rangle}{1 - 2 \langle |S_{21}|^2 \rangle} \right) \right]} \text{moy}(P_{\text{Tx}}) \quad (\text{K.12})$$

L'effet de la désadaptation d'impédance devient important lorsque  $\langle |S_{21}|^2 \rangle \sim 0,167$  (-7,8 dB).

La Figure K.1 montre une valeur moyenne estimée et les largeurs d'un intervalle de confiance à 95 % associé pour la puissance émise obtenue à partir de la mesure d'un matériel en essai rayonnant de référence, en fonction de la fréquence, pour un ou trois emplacements du matériel en essai. La Figure K.2. compare l'incertitude type pour la puissance émise et sa moyenne sur 100 positions du brasseur avec des valeurs théoriques idéales.

Pour une mesure réalisée à un nombre  $M$  d'emplacements du matériel en essai, l'incertitude de mesure de la puissance émise moyenne estimée diminue d'un facteur  $1/\sqrt{M}$ .

### K.3 Immunité

Généralement, pour les mesures de l'immunité, le critère réussite/échec détermine si le matériel en essai présente un signe de défaillance lorsqu'il est éclairé par un champ ou une puissance connu(e). L'estimation des niveaux d'incertitude spécifiés ci-dessous ne concerne pas l'incertitude du processus d'interprétation du signe de défaillance, mais traite uniquement de l'incertitude d'établissement du champ donné.



Les essais d'immunité réalisés dans les chambres réverbérantes sont généralement effectués par rapport au champ maximal ou à l'énergie ou densité de puissance maximale sur une rotation du brasseur de modes, en lieu et place du champ moyen ou de la puissance moyen(ne). Ces valeurs maximales sont des grandeurs (statistiques) aléatoires par rapport à la position spatiale. Par conséquent, les incertitudes associées sont bien plus importantes que dans le cas des émissions.

En supposant une incertitude nulle pour le facteur  $Q$ , le volume de travail et la puissance émise, un intervalle de confiance de  $\eta\%$  pour  $\langle |E_x|_{\max} \rangle$  provenant d'un émetteur à adaptation d'impédance sans perte, comporte des limites données par

$$\xi_{\eta\%}^{\pm} \cong \sqrt{\frac{\lambda \eta_v Q}{6\pi V} \ln \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{2} \left( 1 \pm \frac{\eta}{100} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1}} \langle P_{Tx} \rangle \quad (K.13)$$

où

$\eta_v$  est l'impédance de l'espace libre (en  $\Omega$ );

$V$  est le volume de travail de la chambre (en  $m^3$ );

$Q$  est le facteur de qualité de la chambre à la longueur d'onde  $\lambda$  (adimensionnel);

$N$  est le nombre de positions du brasseur statistiquement indépendantes à la longueur d'onde  $\lambda$ .

L'intervalle est centré autour de la valeur moyenne  $\langle |E_x|_{\max} \rangle$  pouvant être estimée sous la forme

$$\langle |E_x|_{\max} \rangle \approx \sqrt{\frac{\lambda \eta_v Q}{6\pi V} \left[ 0,5772 + \ln(N+1) - \frac{1}{2(N+1)} \right] \langle P_{Tx} \rangle} \quad (K.14)$$

La largeur de l'intervalle de confiance est définie par la différence des percentiles supérieur et inférieur, normalisés par la valeur moyenne, sous la forme

$$\frac{\xi_{\eta\%}^{+} - \xi_{\eta\%}^{-}}{\langle |E_x|_{\max} \rangle} = \frac{\sqrt{\ln \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\eta}{100} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1}} - \sqrt{\ln \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\eta}{100} \right) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1}}}{\sqrt{0,577 + \ln(N+1) - \frac{1}{2(N+1)}}} \quad (K.15)$$

Il est possible de déduire des expressions similaires pour la puissance reçue maximale [4]. Les Figures K.3 et K.4 présentent les limites et les largeurs pour un intervalle de confiance pour les valeurs  $\langle |E_x|_{\max} \rangle$  et  $\langle P_{x,\max} \rangle$  en fonction de  $N$  pour des valeurs choisies de  $\eta\%$ . La Figure K.3 montre l'importance de l'asymétrie de cet intervalle pour une valeur  $N$  relativement faible. En variante, l'incertitude de mesure peut être exprimée en utilisant l'incertitude élargie, sur la base des expressions relatives à l'écart type de  $|E_x|_{\max}$  [4], [6], [7].

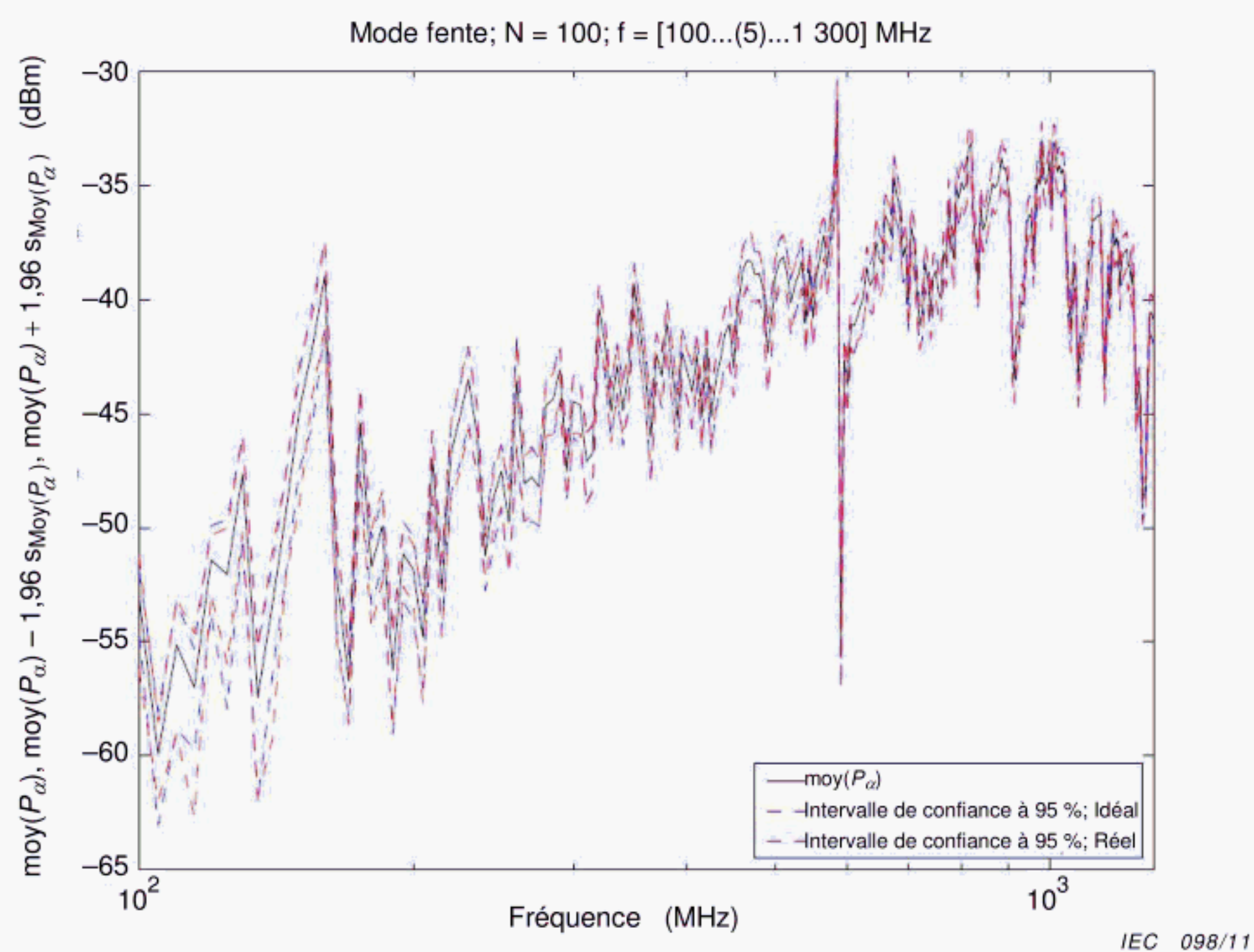
Lorsque la valeur moyenne ou l'écart type de  $|E_x|$  ou  $P_x$  n'est pas connu(e) *a priori* et doit être estimé(e) à partir des données d'essai proprement dites, la distribution et les intervalles de confiance sont plus compliqués [4] et l'incertitude peut être bien plus grande, notamment pour des petites valeurs de  $N$ . Ces petites valeurs peuvent être choisies intentionnellement (afin de réduire le temps d'essai au minimum) ou obligatoirement (à des fréquences relativement faibles).



#### K.4 Documents de référence

- [1] ISO/CEI Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*  
Disponible en anglais seulement.
- [2] CISPR/TR 16-4-1, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 4-1: Incertitudes, statistiques et modélisation des limites – Incertitudes des essais CEM normalisés*  
Disponible en anglais seulement.
- [3] 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 mesure CEM*
- [4] ARNAUT, LR. Measurement uncertainty in reverberation chambers - I. Sample statistics, Report TQE 2, Ed. 2.0, National Physical Laboratory, Teddington, U.K., Dec. 2008. [[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/TQE2.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf)]
- [5] CORONA, P, LATMIRAL, G, PAOLINI, E and PICCIOLI, L, Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 18, no. 2, pp. 54—59, May 1976. Comments and corrections, ibid., vol. 18, no. 4, p. 205, Nov. 1976.
- [6] LADBURY J., KOEPKE G. Koepke, and CAMELL, D., Evaluation of the NASA Langley Research Center mode-stirred chamber facility, NIST Technical Note 1508, Nat. Inst. Stand. Technol., Boulder, CO, pp. 1-282, Jan. 1999.
- [7] ARNAUT, LR. Estimation of maximum field strength and associated confidence intervals for EMC immunity testing in reverberation chambers, Safety & EMC (Beijing), pp. 16-19, May 2008.
- [8] HARRINGTON, TE., Update on informal interlaboratory comparison of reverb, GTEM, FAR, and OATS sites using RefRad and EU FAR Project Simple EUT, In Proceedings 2003 Reverberation Chamber, Anechoic Chamber and OATS Users Meeting, Austin, TX, 29-30 Apr. 2003.





NOTE Voir références [4], [8].

**Figure K.1 – Puissance émise moyenne en fonction de la fréquence pour une antenne non intentionnelle type**



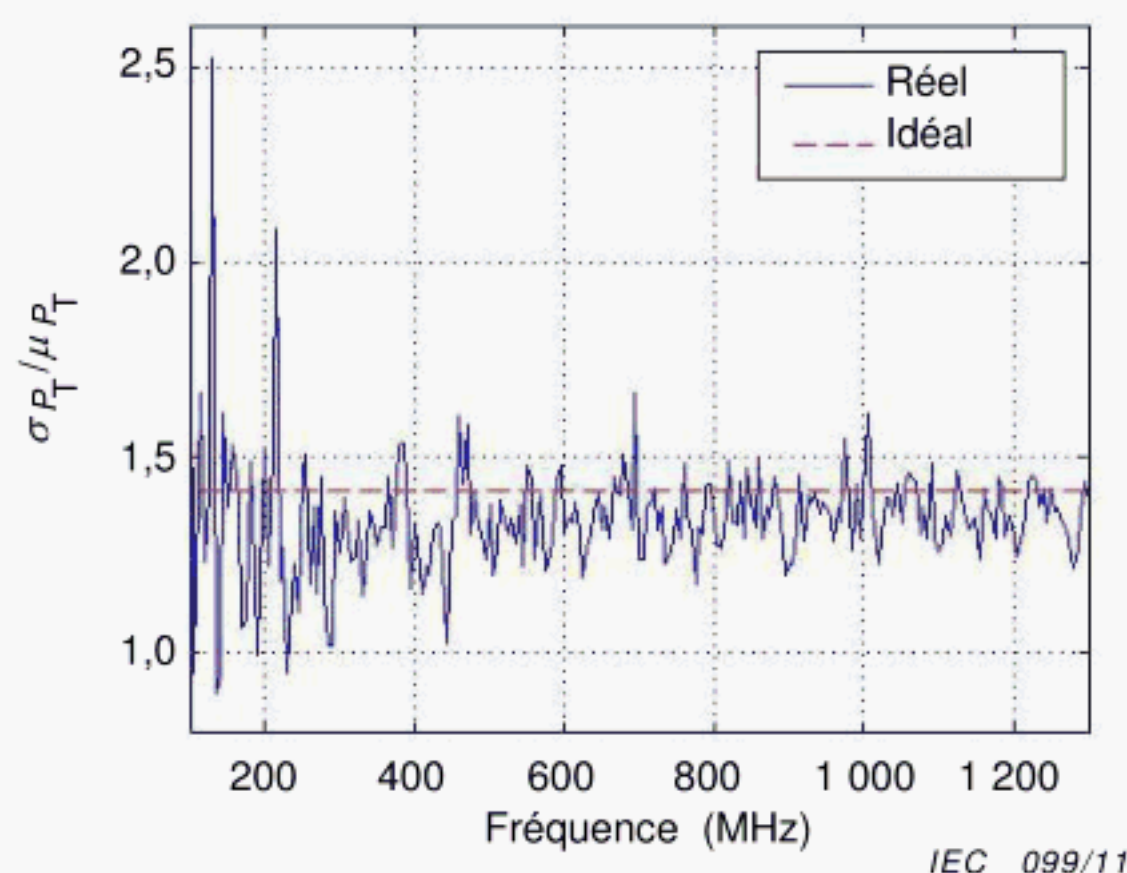


Figure K.2a) – Puissance rayonnée émise par le matériel en essai

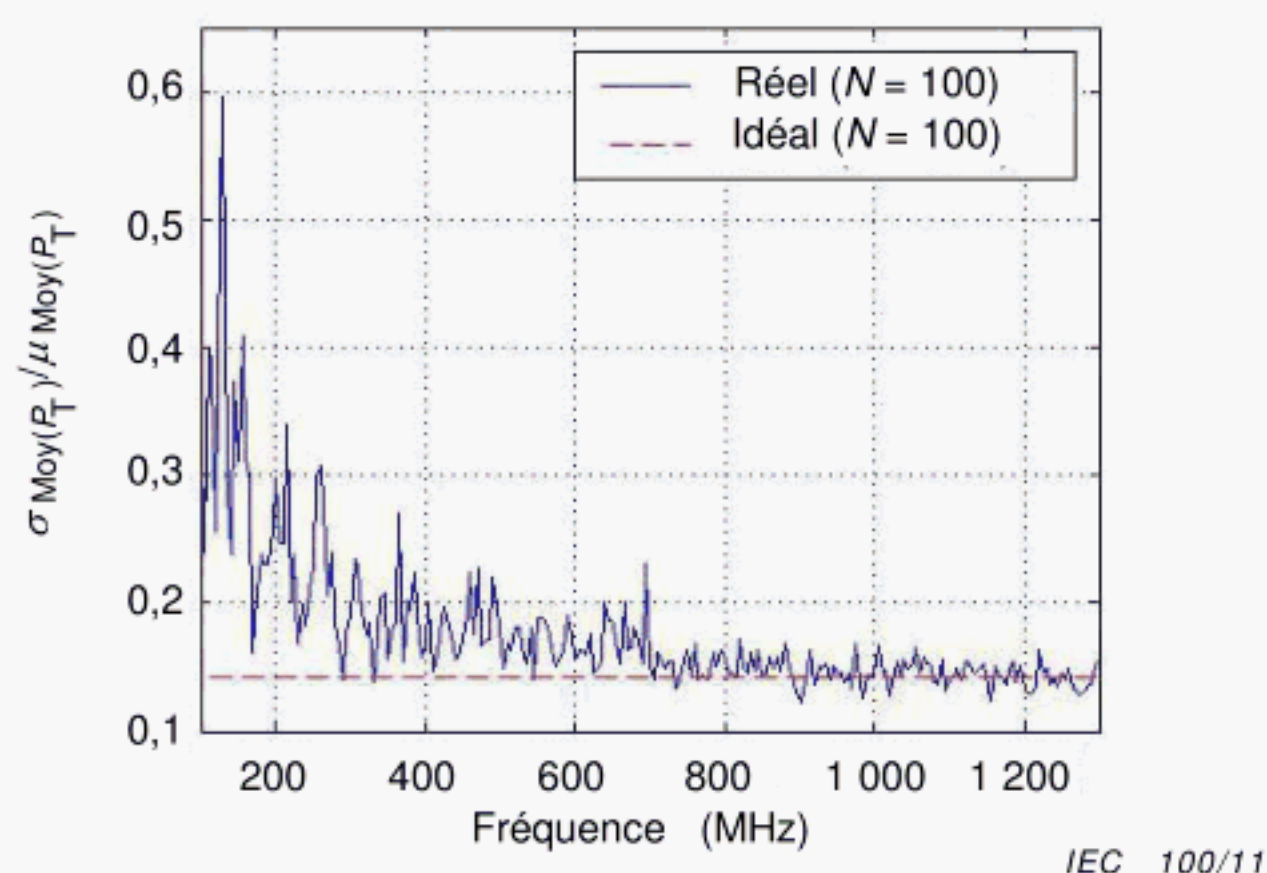
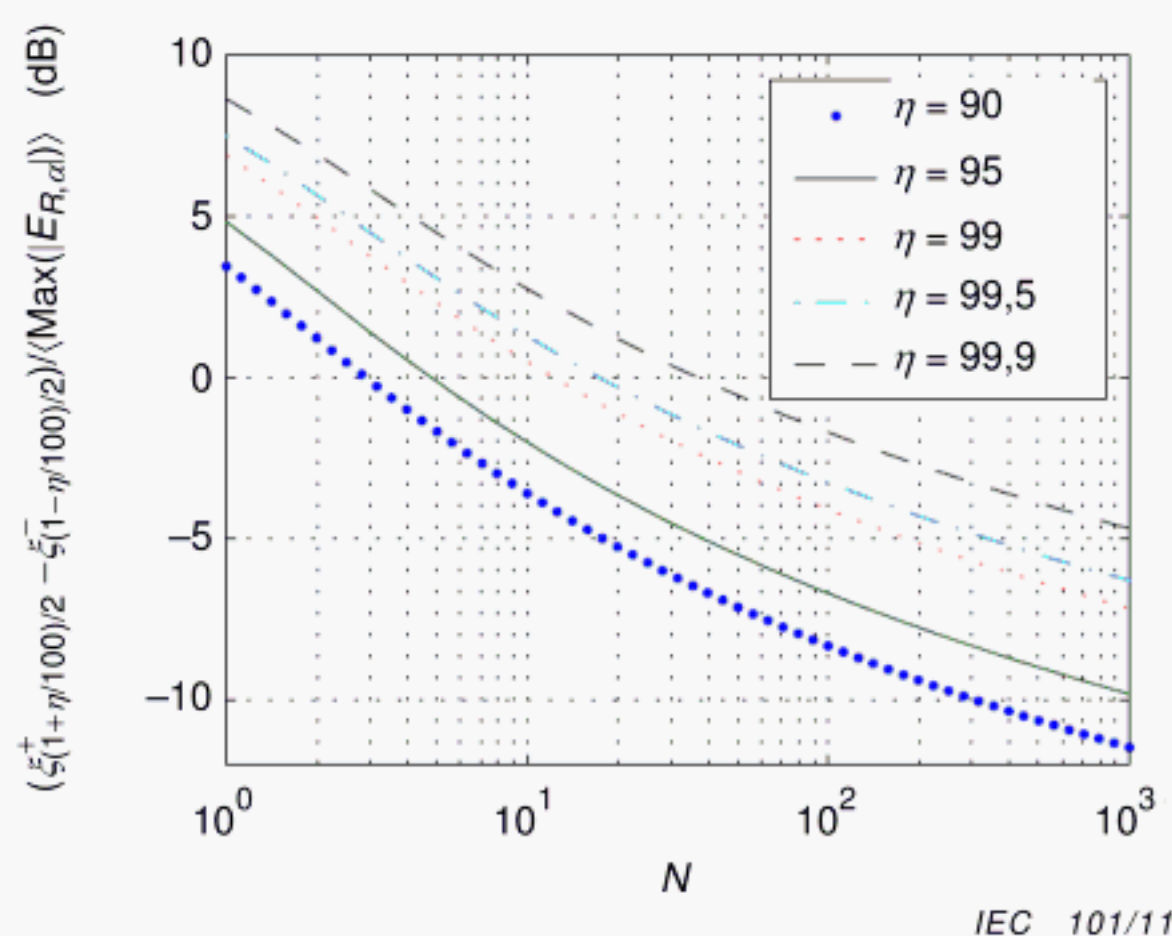


Figure K.2b) – Puissance rayonnée moyenne associée

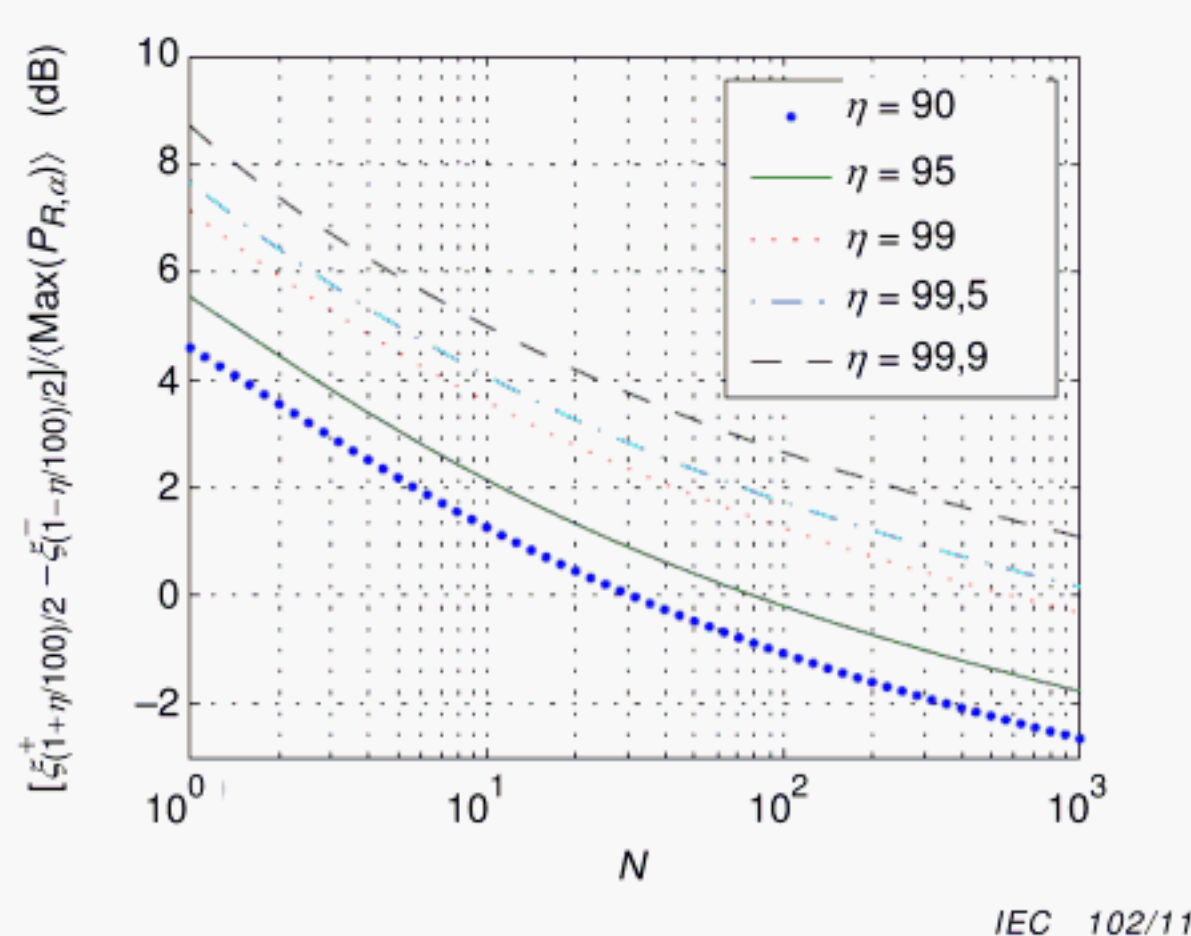
NOTE Incertitude type estimée, normalisée par rapport à la valeur moyenne: (a) pour la puissance rayonnée émise par le matériel en essai (voir Figure K.2a)) et (b) pour la puissance rayonnée moyenne associée, par comparaison aux incertitudes types théoriques pour les caractéristiques de chambre idéales  $\sqrt{2}$  et  $\sqrt{(2/100)}$ , respectivement (voir Figure K2.b)). Dans les deux cas, il est tenu compte des corrélations théoriques respectives mesurées entre les paramètres S.

Figure K.2 – Incertitude estimée normalisée



NOTE La largeur moyenne normalisée  $(\xi^+_{1+\eta}/100 - \xi^-_{1-\eta}/100)/2 / \langle |E_{X,\max}| \rangle$  pour l'intensité de champ maximale  $|E_{X,\max}|$  est associée à un intervalle de confiance à  $\eta\%$  pour  $|E_{X,\max}|$  et est basée sur un nombre spécifié de positions indépendantes N du brasseur.

Figure K.3a) – Largeur moyenne normalisée (en dB) pour un intervalle de confiance à  $\eta\%$  pour l'intensité de champ maximale

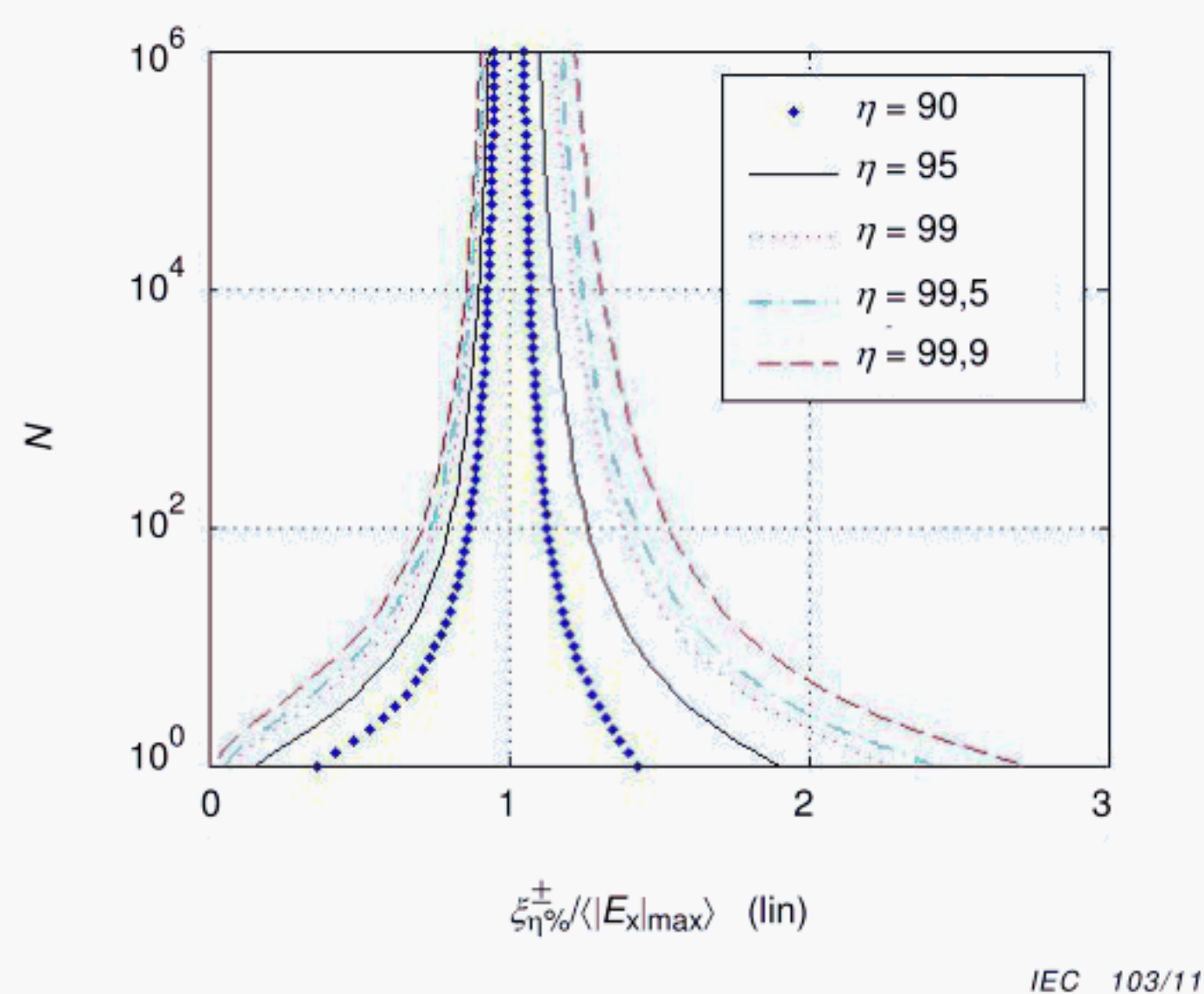


NOTE La largeur moyenne normalisée  $(\xi^+_{1+\eta}/100 - \xi^-_{1-\eta}/100)/2 / \langle P_{X,\max} \rangle$  pour la puissance reçue maximale moyenne de  $P_{X,\max}$  est associée à un intervalle de confiance à  $\eta\%$  pour  $P_{X,\max}$  et est basée sur un nombre spécifié de positions indépendantes N du brasseur.

Figure K.3b) – Largeur moyenne normalisée (en dB) pour un intervalle de confiance à  $\eta\%$  pour la puissance reçue maximale

Figure K.3 – Largeur moyenne normalisée (en dB) pour un intervalle de confiance à  $\eta\%$





NOTE Les limites d'intervalle moyennes normalisées supérieures et inférieures,  $\xi_{\eta\%}^{+}/\langle |E_x|_{\max} \rangle$  et  $\xi_{\eta\%}^{-}/\langle |E_x|_{\max} \rangle$  spécifient un intervalle de confiance à  $\eta\%$  pour  $|E_x|_{\max}$  avec une largeur moyenne normalisée  $(\xi_{\eta\%}^{+} - \xi_{\eta\%}^{-})/\langle |E_x|_{\max} \rangle$ .

**Figure K.4 – Limites d'intervalle moyennes normalisées individuelles (en unités linéaires) pour une intensité de champ maximale en fonction du nombre de positions indépendantes  $N$  du brasseur**



## Bibliographie

CEI 60050-121:1998, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 121: Electromagnétisme*

CEI 60050-151:2001, *Vocabulaire électrotechnique international – Partie 151: Dispositifs électriques et magnétiques*

CEI 60050-393:2003, *Vocabulaire électrotechnique international – Partie 393: Instrumentation nucléaire – Phénomènes physiques et notions fondamentales*

CEI 60050-394:2007, *Vocabulaire électrotechnique international – Partie 394: Instrumentation nucléaire – Instruments, systèmes, équipements et détecteurs*

CEI 60050-702:1992, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 702: Oscillations, signaux et dispositifs associés*

CEI 60050-705:1995, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 705: Propagations des ondes radioélectriques*

CEI 60050-712:1992, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 712: Antennes*

CEI 60050-723:1997, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 723: Radiodiffusion et télédiffusions: Son, télévision, données*

Amendement 1 (1999)

CEI 60050-726:1982, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 726: Lignes de transmission et guides d'ondes*

CEI 60050-731:1991, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 731: Télécommunications par fibres optiques*

CEI 60050-801:1994, *Vocabulaire électrotechnique international – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*

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

CISPR 16-1-2, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-2: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Matériels auxiliaires – Perturbations conduites*

CISPR 16-1-3, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-3: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Matériels auxiliaires – Puissance perturbatrice*

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 16-1-5, *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1-5: Appareils de*



*mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques  
– Emplacements d'essai pour l'étalonnage des antennes de 30 MHz à 1 000 MHz*

*CISPR 16-2-1, Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 2-1: Méthodes de mesure des perturbations et de l'immunité – Mesures des perturbations conduites*

*CISPR 16-2-2, Spécifications aux perturbations radioélectriques des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 2-2: Méthodes de mesure des perturbations et de l'immunité – Mesure de la puissance perturbatrice*

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

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

---







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](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)