

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61000-4-23

Première édition
First edition
2000-10

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM
BASIC EMC PUBLICATION

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 4-23:

**Techniques d'essai et de mesure –
Méthodes d'essai pour les dispositifs
de protection pour perturbations IEMN-HA
et autres perturbations rayonnées**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 4-23:

**Testing and measurement techniques –
Test methods for protective devices for HEMP
and other radiated disturbances**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61000-4-23:2000

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

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

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

- **IEC Just Published**

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

- **Service clients**

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

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

Publication numbering

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

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee, which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

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

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

- **IEC Just Published**

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

- **Customer Service Centre**

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

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

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61000-4-23

Première édition
First edition
2000-10

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM
BASIC EMC PUBLICATION

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 4-23:

**Techniques d'essai et de mesure –
Méthodes d'essai pour les dispositifs
de protection pour perturbations IEMN-HA
et autres perturbations rayonnées**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 4-23:

**Testing and measurement techniques –
Test methods for protective devices for HEMP
and other radiated disturbances**

© IEC 2000 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XD

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
 Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives.....	8
3 Définitions.....	10
4 Concepts d'essai IEMN-HA	20
4.1 Essais sur enceinte de blindage	22
4.1.1 Bâtiments.....	28
4.1.2 Abris et salles	30
4.1.3 Coffrets, casiers et boîtiers.....	32
4.2 Essais de câbles et connecteurs blindés.....	36
4.2.1 Essais de blindage de câble	38
4.2.2 Essais de connecteurs de câble	42
4.3 Essais des matériaux de blindage	44
4.3.1 Joints conducteurs	44
4.3.2 Plaques et écrans conducteurs	48
4.3.3 Guides d'onde de coupure et nids d'abeille	54
4.4 Résumé des concepts d'essai	56
5 Procédures d'essai IEMN-HA	58
5.1 Essais de champ électromagnétique	58
5.1.1 Essais de champ d'impulsion.....	58
5.1.2 Essais de champ en ondes non modulées	66
5.2 Procédures d'essai d'injection de courant.....	94
5.2.1 Essais d'injection sur enceintes	94
5.2.2 Impédance et admittance de transfert des blindages de câble et connecteurs	98
5.2.3 Essai du matériau du joint	98
Annexe A (informative) Concepts d'essai IEMN-HA pour systèmes électriques.....	104
Annexe B (informative) Caractérisation des câbles blindés.....	120
Annexe C (informative) Matériel de mesure des impulsions IEMN-HA.....	130
Annexe D (informative) Matériel d'essai à ondes non modulées	148
Annexe E (informative) Caractérisation d'un blindage plan pour protection IEMN-HA.....	164
 Bibliographie	182

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Definitions	11
4 HEMP test concepts	21
4.1 Testing of shielding enclosures	23
4.1.1 Buildings	29
4.1.2 Shelters and rooms	31
4.1.3 Cabinets, racks and boxes	33
4.2 Testing of shielded cables and connectors	37
4.2.1 Testing of cable shields	39
4.2.2 Testing of cable connectors	43
4.3 Testing of shielding materials	45
4.3.1 Conducting gaskets	45
4.3.2 Conducting sheets and screens	49
4.3.3 Cut-off waveguides and honeycombs	55
4.4 Test concept summary	57
5 HEMP test procedures	59
5.1 Electromagnetic field testing	59
5.1.1 Pulse field testing	59
5.1.2 CW field testing	67
5.2 Current injection test procedures	95
5.2.1 Injection testing of enclosures	95
5.2.2 Transfer impedance and admittance of cable shields and connectors	99
5.2.3 Testing of gasket material	99
Annex A (informative) HEMP test concepts for electrical systems	105
Annex B (informative) Characterization of shielded cables	121
Annex C (informative) Equipment for HEMP pulse measurements	131
Annex D (informative) Equipment for CW testing	149
Annex E (informative) Characterization of a planar shield for HEMP protection	165
Bibliography	183

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 4-23: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection pour perturbations IEMN-HA et autres perturbations rayonnées

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 61000-4-23 a été établie par le sous-comité 77C: Phénomènes transitoires de forte intensité, du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique. Elle a le statut de publication fondamentale en CEM conformément au Guide 107 de la CEI.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
77C/92/FDIS	77C/97/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Les annexes A, B, C, D et E sont données uniquement à titre d'information.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2007. A cette date, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –**Part 4-23: Testing and measurement techniques –
Test methods for protective devices for HEMP
and other radiated disturbances**

FOREWORD

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

International Standard IEC 61000-4-23 has been prepared by subcommittee 77C: High power transient phenomena, of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility. It has the status of a basic EMC publication in accordance with IEC Guide 107.

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

FDIS	Report on voting
77C/92/FDIS	77C/97/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Annexes A, B, C, D and E are for information only.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2007. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

La présente norme fait partie de la série des normes 61000 de la CEI, selon la répartition suivante:

Partie 1: Généralités

Considérations générales (introduction, principes fondamentaux)

Définitions, terminologie

Partie 2: Environnement

Description de l'environnement

Classification de l'environnement

Niveaux de compatibilité

Partie 3: Limites

Limites d'émission

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

Partie 4: Techniques d'essai et de mesure

Techniques de mesure

Techniques d'essai

Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation

Guide pour l'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 certaines ont déjà été publiées en tant que sections. D'autres seront publiées sous le numéro de la partie, suivi d'un tiret et complété d'un second chiffre identifiant la subdivision (exemple 61000-6-1).

INTRODUCTION

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

Part 1: General

General considerations (introduction, fundamental principles)

Definitions, terminology

Part 2: Environment

Description of the environment

Classification of the environment

Compatibility levels

Part 3: Limits

Emission limits

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

Part 4: Testing and measurement techniques

Measurement techniques

Testing techniques

Part 5: Installation and mitigation guidelines

Installation guidelines

Mitigation methods and devices

Part 6: Generic standards

Part 9: Miscellaneous

Each part is further subdivided into several parts and 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: 61000-6-1).

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 4-23: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection pour perturbations IEMN-HA et autres perturbations rayonnées

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61000 étudie les principales raisons justifiant les essais pratiqués sur les dispositifs IEMN-HA et fournit une courte description des concepts les plus importants relatifs aux essais des éléments de blindage. Pour chaque essai, les informations de base suivantes sont fournies:

- fondement théorique de l'essai (le concept d'essai);
- montage d'essai;
- matériel requis;
- procédures d'essai;
- traitement de données.

La présente Norme internationale ne fournit aucune information concernant les prescriptions relatives à des niveaux d'essai spécifiques.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 61000. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 61000 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

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

CEI 60096-1:1986, *Câbles pour fréquences radioélectriques – Première partie: Prescriptions générales et méthodes de mesure*

CEI 60625 (toutes les parties), *Instruments de mesurage programmables – Système d'interface (bits parallèles, octets série)*

CEI 61000-2-9, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2: Environnement – Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations radiantes. Publication fondamentale en CEM*

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

ANSI/IEEE Std 488.1:1987, *Standard IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation, 02-Feb-1988*

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances

1 Scope

This part of IEC 61000 provides the basic reasons behind HEMP testing and gives a brief description of the most important concepts for shielding element testing. For each test, the following basic information is provided:

- theoretical foundation of the test (the test concept);
- test set-up;
- required equipment;
- test procedures;
- data processing.

This International Standard does not provide information on requirements for specific levels for testing.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 61000. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this part of IEC 61000 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

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

IEC 60096-1:1986, *Radio-frequency cables – Part 1: General requirements and measuring methods*

IEC 60625 (all parts), *Programmable measuring instruments – Interface system (byte serial, bit parallel)*

IEC 61000-2-9, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance. Basic EMC publication*

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

ANSI/IEEE Std 488.1:1987, *Standard IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation, 02-Feb-1988*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61000, les définitions suivantes et celles de la CEI 60050(161) s'appliquent.

3.1

ouverture

interruption dans la barrière électromagnétique (blindage) par laquelle des champs électromagnétiques peuvent pénétrer

3.2

point d'entrée d'ouverture

points incluant les trous, craquelures et ouvertures prévus ou non, ainsi que d'autres discontinuités au niveau de la surface de blindage du système

NOTE Des points d'entrée sont prévus pour permettre l'entrée et la sortie du personnel et/ou du matériel, ainsi que pour la ventilation au travers d'une barrière électromagnétique.

3.3

atténuation

réduction d'amplitude (résultant de l'absorption et de la diffraction) d'un champ électrique ou magnétique, d'un courant ou d'une tension, généralement exprimée en décibels

3.4

largeur de bande

3.4.1

largeur de bande d'un dispositif

largeur de la bande de fréquences à l'intérieur de laquelle une caractéristique donnée d'un appareil ou d'une voie de transmission ne s'écarte pas d'une valeur de référence de plus d'une quantité spécifiée en valeur absolue ou relative
[VEI 161-06-09]

3.4.2

largeur de bande d'une émission ou d'un signal

largeur d'une bande de fréquences à l'extérieur de laquelle toute composante spectrale ne dépasse pas un pourcentage spécifié d'un niveau de référence
[VEI 161-06-10]

3.5

simulateur à onde confinée

type de simulateur permettant de produire des champs électromagnétiques dans une région bien délimitée de l'espace appelée «volume d'essai»

3.6

boîte

enceinte qui contient un équipement électrique

NOTE Ces boîtes contiennent généralement des modules de sous-systèmes.

3.7

large bande

3.7.1

émission à large bande

émission dont la largeur de bande est supérieure à celle d'un récepteur ou d'un appareil de mesure donné

[VEI 161-06-11]

3 Definitions

For the purposes of this part of IEC 61000, the following definitions, together with those in IEC 60050(161) apply.

3.1

aperture

opening in an electromagnetic barrier (shield) through which EM fields may penetrate

3.2

aperture point-of-entry

aperture port-of-entry

aperture points-of-entry including intentional or inadvertent holes, cracks, openings or other discontinuities in a shield surface

NOTE Intentional aperture points of entry are provided for personnel and/or equipment entry and egress and for ventilation through an electromagnetic barrier.

3.3

attenuation

reduction in magnitude (as a result of absorption and scattering) of an electric or magnetic field, a current or a voltage, usually expressed in decibels

3.4

bandwidth

3.4.1

(of a device)

width of a frequency band over which a given characteristic of an equipment or transmission channel does not differ from its reference value by more than a specified amount or ratio [IEV 161-06-09]

3.4.2

(of an emission or signal)

width of the frequency band outside which the level of any spectral component does not exceed a specified percentage of a reference level [IEV 161-06-10]

3.5

bounded wave simulator

type of simulator for producing electromagnetic fields in a localized region of space referred to as a "test volume"

3.6

box

enclosure that contains electrical equipment

NOTE Such boxes usually contain modules of subsystems.

3.7

broadband

wideband

3.7.1

(of an emission)

emission which has a bandwidth greater than that of a particular measuring apparatus or receiver [IEV 161-06-11]

3.7.2

dispositif à large bande

dispositif dont la largeur de bande est telle qu'il peut recevoir et traiter toutes les composantes spectrales d'une émission donnée

[VEI 161-06-12]

3.8

circuit

ensemble d'éléments électroniques interconnectés formant un ou plusieurs chemins fermés

3.9

point d'entrée conducteur

conducteur à pénétration

fil, câble électrique ou autre objet conducteur, tel qu'une tige métallique, traversant la barrière électromagnétique

3.10

couplage

interaction de champs électromagnétiques et de circuits électriques au cours de laquelle une partie de l'énergie du champ est transférée au circuit

3.11

injection de courant

processus dans lequel, par l'intermédiaire de moyens extérieurs, on introduit un courant dans un circuit à un endroit souhaité. Dans le cadre des essais IEM, il s'agit d'un processus suivant lequel on introduit des impulsions de courant transitoires IEM simulées dans un composant, un circuit ou un système en fonctionnement afin de mesurer les seuils d'endommagement et de perturbation

3.12

essai par injection de courant

CIT

technique d'essai utilisant l'injection de courant

3.13

fréquence de coupure (pour un guide d'onde)

la fréquence la plus basse pour laquelle il n'y a pas d'atténuation des champs électromagnétiques se propageant dans un guide d'onde sans pertes. Au dessous de cette fréquence, les champs diminuent exponentiellement avec la distance le long du guide d'onde

3.14

dipôle

antenne droite, généralement alimentée en son centre, produisant un rayonnement maximal dans un plan normal à son axe principal

3.15

essai direct

excitation d'un système électrique par l'application directe d'une tension ou l'injection directe d'un courant (transitoire ou en régime permanent) dans un système de câbles ou sur une surface afin de simuler les effets d'une impulsion EM transitoire (voir injection de courant)

3.16

pénétration de champ directe

pénétration du blindage du système par le champ EM

3.7.2**(device)**

device whose bandwidth is such that it is able to accept and process all the spectral components of a particular emission
[IEV 161-06-12]

3.8**circuit**

collection of interconnected electronics forming one or more closed paths

3.9**conductive point-of-entry****conductive port-of-entry****penetrating conductor**

electrical wire or cable or other conductive object, such as a metal rod, which passes through the electromagnetic barrier

3.10**coupling**

interaction of electromagnetic fields with electrical systems, whereby part of the energy of the field is transferred to the system

3.11**current injection**

process, by which through some external means, a current is forced to flow in a circuit at a desired location. For EMP testing purposes, it is a process by which simulated EMP transient current pulses are introduced into a component, circuit or system to measure damage or upset thresholds

3.12**current injection test****CIT**

test technique using current injection

3.13**cut-off frequency (for a waveguide)**

lowest frequency for which there is no attenuation of the electromagnetic fields propagating in a lossless waveguide. Below this frequency, the fields attenuate exponentially with distance along the waveguide

3.14**dipole**

straight antenna, usually fed in the centre, that produces maximum radiation in a plane normal to its principal axis

3.15**direct drive**

excitation of an electrical system by directly applying a voltage or current source (either transient or continuous wave) to system cables or surfaces as a means of simulating the effects of transient EM pulses (see current injection)

3.16**direct field penetration**

penetration of the system shielding by the EM field

3.17

direction de propagation

direction du vecteur de propagation k d'une onde électromagnétique plane, perpendiculaire au plan contenant les vecteurs des champs électriques et magnétiques

3.18

intensité de champ électrique

E

amplitude du vecteur de champ électrique d'une onde électromagnétique ou d'un champ créé par une répartition de charge électrique, mesurée en volts par mètre

3.19

barrière électromagnétique

blindage

surface topologiquement fermée réalisée afin d'empêcher ou de limiter la pénétration des champs EM et des transitoires conduits dans l'espace clos. La barrière comprend la surface de blindage et les points d'entrée protégés et inclut le volume protégé

3.20

perturbation électromagnétique

phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système, ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte

[VEI 161-01-05]

3.21

environnement électromagnétique

ensemble des phénomènes électromagnétiques existant à un endroit donné

[VEI 161-01-01]

3.22

impulsion électromagnétique (IEM)

impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN)

tout type de champ électromagnétique produit par une explosion nucléaire. Appelée quelques fois aussi impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN)

3.23

rayonnement électromagnétique

a) processus par lequel une source fournit de l'énergie vers l'espace extérieur, sous forme d'ondes électromagnétiques

b) énergie transportée dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques

[VEI 161-01-10]

3.24

topologie électromagnétique

description de l'interconnexion des blindages ou des barrières d'un système, délimitant l'environnement IEM dans le système

3.25

couplage externe

processus par lequel un champ électromagnétique incident illumine les parties externes d'une enceinte en matériau conducteur et induit sur celle-ci un courant et une charge

3.17**direction of propagation**

direction of the electromagnetic plane-wave propagation vector k , which is perpendicular to the plane containing the vectors of the electric and the magnetic fields

3.18**electric field strength****E**

magnitude of the electric field vector of an electromagnetic wave, or of a field created by an electric charge distribution measured in volts per metre

3.19**electromagnetic barrier
shield**

topologically closed surface made to prevent or limit EM fields and conducted transients from entering the enclosed space. The barrier consists of the shield surface and points-of-entry treatments, and it encloses the protected volume

3.20**electromagnetic disturbance**

any electromagnetic phenomenon which may degrade the performance of a device, equipment or system, or adversely affect living or inert matter
[IEV 161-01-05]

3.21**electromagnetic environment**

totality of electromagnetic phenomena existing at a given location
[IEV 161-01-01]

3.22**electromagnetic pulse (EMP)
nuclear electromagnetic pulse (NEMP)**

all types of electromagnetic fields produced by a nuclear explosion. Also referred to as nuclear electromagnetic pulse (NEMP)

3.23**electromagnetic radiation**

a) phenomenon by which energy in the form of electromagnetic waves emanates from a source into space

b) energy transferred through space in the form of electromagnetic waves

[IEV 161-01-10]

3.24**electromagnetic topology**

description of the interconnection of shields or electromagnetic barriers in a system that limit the EMP environment within the system

3.25**external coupling**

process by which an incident electromagnetic field strikes the exterior portions of a conducting system enclosure and induces current and charge

3.26

joint

élément flexible, généralement conducteur, utilisé pour sceller une ouverture dans une enceinte

3.27

durcissement

processus consistant à réduire la vulnérabilité d'un système ou d'un composant par des techniques de conception, par exemple en fournissant une protection ou un découplage par rapport à un environnement extérieur indésirable, tel que l'IEM

3.28

impulsion électromagnétique à haute altitude

IEM-HA

impulsion électromagnétique produite lorsqu'une explosion nucléaire survient en dehors de l'atmosphère terrestre, généralement au-delà de 30 km

3.29

intensité de champ magnétique

H

amplitude du vecteur de champ magnétique d'une onde électromagnétique ou champ généré par un courant qui s'écoule dans un fil, une antenne cadre, etc.

3.30

blindage global

protection d'une entité entière grâce à l'utilisation d'une enceinte de blindage unique ou d'un équivalent pratique, par exemple la protection du contenu d'un bâtiment entier par blindage de l'ensemble du bâtiment

3.31

simulateur IEM à plaques parallèles

appareil d'essai utilisant le champ électromagnétique existant entre les plaques d'une ligne de transmission parallèle afin de simuler approximativement une IEM. L'appareil comprend généralement un générateur d'impulsions, des prises d'entrée et de sortie sur la ligne ainsi qu'une résistance de terminaison adaptée servant à minimiser les réflexions

3.32

pénétration

transfert d'énergie électromagnétique d'un volume à un autre au travers d'une barrière électromagnétique. Ce transfert peut s'effectuer par diffusion du champ au travers de la barrière, par des fuites du champ à travers des ouvertures et par un courant électrique passant par des conducteurs reliant les deux volumes (fils, câbles, tubes, tuyaux, conduits, etc.)

3.33

point d'entrée

PoE

emplacement physique (point) sur la barrière électromagnétique, au niveau duquel l'énergie EM est susceptible de pénétrer dans un volume topologique ou d'en sortir, à moins qu'un dispositif de protection adéquat ne soit installé. Un point d'entrée n'est pas délimité par un point géométrique. Les points d'entrée sont divisés en points d'entrée d'ouverture ou en points d'entrée à conducteur en fonction du type de pénétration. Ils sont également subdivisés en points d'entrée architecturaux, mécaniques, structurels ou électriques en fonction du cadre architectural dans lequel on les rencontre le plus fréquemment

3.26**gasket**

flexible element, normally electrically conductive, used to seal an aperture in an enclosure

3.27**hardening**

the process of decreasing vulnerability of a system or component by design techniques, e.g. protecting against, or decoupling from, an undesirable external environment, such as EMP

3.28**high-altitude electromagnetic pulse****HEMP**

electromagnetic pulse produced when a nuclear explosion occurs outside the earth's atmosphere, typically above an altitude of 30 km

3.29**magnetic field strength****H**

magnitude of the magnetic field vector of an electromagnetic wave, or the field produced by a current flowing in a wire, loop antenna, etc.

3.30**overall shielding****global shielding**

protection of an entire entity by use of a single shielding enclosure or some practical equivalent, such as the protection of the contents of an entire building by shielding the entire building

3.31**parallel plate EMP simulator**

test apparatus using the electromagnetic field between the plates of a parallel plate transmission line to approximate an EMP. The apparatus usually consists of a pulse generator, tapered input and output sections on the line, and a terminating resistor to minimize reflections

3.32**penetration**

transfer of electromagnetic energy through an electromagnetic barrier from one volume to another. This can occur by field diffusion through the barrier, by field leakage through apertures, and by electrical current passing through conductors connecting the two volumes (wires, cables, conduits, pipes, ducts, etc.)

3.33**point-of-entry (PoE)****port-of-entry (PoE)**

physical location (point/port) on the electromagnetic barrier, where EM energy may enter or exit a topological volume, unless an adequate PoE protective device is provided. A PoE is not limited to a geometrical point. PoEs are classified as aperture PoEs or conductor PoEs according to the type of penetration. They are also classified as architectural, mechanical, structural or electrical PoEs according to the architectural engineering discipline in which they are usually encountered

3.34

dispositif de protection de point d'entrée

traitement de point d'entrée

mesure protectrice utilisée pour empêcher ou limiter la pénétration de l'énergie EM dans un volume protégé au niveau d'un point d'entrée. Les dispositifs de protection de points d'entrée courants comprennent des guides d'onde en dessous de la fréquence de coupure, des plaques de fermeture dans le cas des points d'entrée d'ouverture, ainsi que des filtres et limiteurs de surtension au niveau des conducteurs à pénétration

3.35

volume protégé

espace tridimensionnel délimité par une barrière électromagnétique

3.36

impulsion

variation brusque et de courte durée d'une grandeur physique suivie d'un retour rapide à sa valeur initiale

[VEI 161-02-02]

3.37

radiofréquence

RF

fréquence située, dans le spectre électromagnétique, entre la fréquence audio et l'infrarouge

NOTE Les fréquences audio sont parfois aussi intégrées dans cette définition.

3.38

champs de pénétration du blindage

champs présents à l'intérieur d'une enceinte blindée. Les champs intérieurs existent parce que le blindage est fait de matériaux à conductivité finie et lorsqu'il n'est pas parfait (présente des trous, ouvertures)

3.39

cage de Faraday

enceinte fermée par des parois métalliques pleines ou grillagées, destinée à séparer électromagnétiquement l'intérieur et l'extérieur

[VEI 161-04-37]

3.40

dégradation du blindage

réduction générale ou localisée de l'efficacité du blindage électromagnétique due à la présence d'ouvertures, à des pénétrations, à l'usure, à une mauvaise utilisation, etc.

3.41

efficacité de blindage

mesure de la réduction ou de l'atténuation de l'intensité du champ électromagnétique en un point de l'espace, provoquée par l'insertion d'un blindage entre la source et ce point, généralement exprimée en décibels (dB)

3.42

effet de peau

tendance du courant alternatif à se concentrer dans la couche superficielle d'un conducteur. Il en résulte que la résistance effective du conducteur augmente avec la fréquence

3.34**PoE protective device****PoE treatment**

protective measure used to prevent or limit EM energy from entering a protected volume at a PoE. Common PoE protective devices include waveguides below cut-off, closure plates for aperture PoEs, and filters and surge arresters on penetrating conductors

3.35**protected volume**

three-dimensional space enclosed by an electromagnetic barrier

3.36**pulse**

abrupt variation of short duration of a physical quantity followed by a rapid return to the initial value

[IEV 161-02-02]

3.37**radiofrequency****RF**

frequency of the electromagnetic spectrum that is between the audiofrequency portion and the infrared portion

NOTE Sometimes audiofrequencies are considered to be included.

3.38**shield penetrating fields**

interior fields which are found in a shielded enclosure. Such interior fields exist because the shield is made of finitely conducting material and when it is imperfect (by having holes or other apertures)

3.39**shielded enclosure
screened room**

mesh or sheet metallic housing designed expressly for the purpose of separating electromagnetically the internal and external environment

[IEV 161-04-37]

3.40**shielding degradation**

general or localized reduction of electromagnetic shielding effectiveness as a result of openings, penetrations, wear, improper utilization, etc.

3.41**shielding effectiveness**

measure of the reduction or attenuation in the electromagnetic field strength at a point in space caused by the insertion of a shield between the source and that point, usually expressed in decibels (dB)

3.42**skin effect**

tendency of alternating current to concentrate in the surface layer of a conductor. As a result, the effective resistance of the conductor increases with frequency

3.43

système

- a) regroupement de sous-systèmes, ensembles et/ou composants fonctionnant ensemble de façon cohérente afin de remplir une mission de base
- b) ensemble de dispositifs, sous-systèmes, personnel qualifié et techniques pouvant réaliser ou remplir un rôle opérationnel défini. Un système complet comprend les installations, dispositifs, sous-systèmes, matériaux, services et personnel associés requis pour assurer son fonctionnement selon un degré jugé suffisant dans son environnement de fonctionnement et de support

3.44

transitoire

se dit d'un phénomène ou d'une grandeur qui varie entre deux régimes établis consécutifs dans un intervalle de temps relativement court à l'échelle des temps considérée
[VEI 161-02-01]

3.45

dispositifs de protection contre les transitoires

dispositif de protection contre les transitoires (TPD) fournissant une protection à un point d'entrée conducteur. Il peut, par exemple, inclure un ou plusieurs des éléments suivants: éclateur, varistance à oxyde métallique (MOV) ou filtre. Ces dispositifs sont utilisés pour réduire la contrainte électrique pénétrant une barrière électromagnétique

3.46

impédance d'onde

rapport entre l'intensité de champ électrique et l'intensité de champ magnétique au niveau du point d'observation, exprimé en ohms (Ω)

3.47

guide d'onde en dessous de la fréquence de coupure

guide d'onde dont le principal objectif est d'atténuer les ondes électromagnétiques au niveau de fréquences inférieures à la fréquence de coupure la plus basse, tout en permettant l'existence d'une ouverture physique à travers une enceinte blindée

3.48

ensemble de guides d'onde en dessous de la fréquence de coupure

ensemble de guides d'onde parallèles en dessous de la fréquence de coupure, utilisé lorsque la surface d'une ouverture blindée nécessaire pour obtenir un flux liquide ou gazeux compris dans les limites de chute de pression dépasse la valeur autorisée pour un guide d'onde unique, en dessous de la fréquence de coupure

3.49

treillis métallique

maille de fils soudés utilisée normalement pour protéger les ouvertures dans une barrière électromagnétique

4 Concepts d'essai IEMN-HA

La description et l'utilisation de la *topologie du blindage électromagnétique* du système constitue un des aspects clés de la protection IEMN-HA. Il s'agit de localiser et de caractériser les diverses surfaces (ou barrières électromagnétiques) comprises dans les régions (volumes) englobant le système, protégées contre l'IEMN-HA. Généralement, ces surfaces sont réalisées dans un matériau conducteur, comme dans le cas d'un blindage métallique. Dans les systèmes réels, des ouvertures doivent être pratiquées dans les blindages afin de permettre une exploitation normale du matériel à l'intérieur. Ces ouvertures dégradent le blindage et, si la dégradation est trop importante, divers types de dispositifs de protection IEMN-HA doivent être installés au niveau de ces points de pénétration du blindage. Les emplacements des divers points de pénétration et les types de dispositifs de protection déterminent l'emplacement et le type des essais à réaliser pour vérifier le blindage du système.

3.43**system**

- a) collection of subsystems, assemblies and/or components that function together in a coherent way to accomplish a basic mission
- b) collection of equipment, subsystems, skilled personnel, and techniques capable of performing or supporting a defined operational role. A complete system includes related facilities, equipment, subsystems, materials, services and personnel required for its operation to the degree that it can be considered self-sufficient within its operational or support environment

3.44**transient**

pertaining to or designating a phenomenon or a quantity which varies between two consecutive steady states during a time interval short compared with the time-scale of interest
[IEV 161-02-01]

3.45**transient protection devices****TPD**

transient suppression devices

transient attenuation devices

device providing protection to a conductive PoE. It may, for example, consist of one or more of the following: a spark gap, a metal oxide varistor (MOV) or a filter. These devices are used to reduce the electrical disturbance which penetrates an electromagnetic barrier

3.46**wave impedance**

ratio of electric field intensity to magnetic field intensity at the point of observation, expressed in ohms (Ω)

3.47**waveguide below cut-off**

waveguide whose primary purpose is to attenuate electromagnetic waves at frequencies below its lowest cut-off frequency, while at the same time providing a physical opening into a shielded enclosure

3.48**waveguide below cut-off array**

assembly of parallel waveguides below cut-off, used when the area of a shield aperture required to obtain adequate fluid or air flow within pressure drop limitations is larger than the permissible area of a single waveguide below cut-off

3.49**wire mesh**

connected wire fabric normally used for protection of apertures in an electromagnetic barrier

4 HEMP test concepts

A key aspect in HEMP protection is describing and using the *electromagnetic shielding topology* of the system. This amounts to locating and characterizing the various surfaces (or electromagnetic barriers) within the system enclosing regions (volumes) protected against HEMP. Usually, these surfaces are made of conducting material, as in the case of a metal shield. In real systems, openings shall be present in the shields for the normal operation and functioning of the equipment inside. These openings degrade the shielding, and if the degradation is too large, various types of HEMP protection devices shall be provided at these penetration points in the shield. The location of the various penetration points, and the types of protective devices determine the location and type of test to be conducted to verify the system shielding.

A titre d'exemple, étudions le cas hypothétique d'un bâtiment comportant une salle fortement blindée. A l'intérieur de cette salle, supposons que plusieurs boîtiers de matériel sont reliés par des câbles et des connecteurs blindés. La première surface de blindage de ce système est constituée par l'enceinte du bâtiment. En fonction du type de bâtiment, elle peut constituer ou non un blindage important pour le volume intérieur. De larges ouvertures sous la forme de portes et de fenêtres ainsi que des éléments de pénétration conducteurs pour les lignes d'alimentation électrique et de communication peuvent exister. Il est nécessaire d'effectuer des essais au niveau de ces mécanismes de pénétration individuels afin d'évaluer le blindage fourni par cette enceinte.

A l'intérieur du bâtiment, le champ IEMN-HA est quelque peu atténué par les parois ou l'enceinte du bâtiment. Ainsi, la contrainte électrique subie par la salle blindée interne est inférieure à celle du champ IEMN-HA extérieur ambiant. La salle blindée interne étant spécifiquement conçue pour réduire les champs EM à l'intérieur, on peut prévoir qu'elle fonctionne correctement – si les divers dispositifs de protection appliqués au niveau des pénétrations de blindage sont opérationnels. Les pénétrations de champ au travers de craquelures et de jointures dans les parois, la diffusion au travers du matériau de blindage et les pénétrations conductrices le long des fils de transmission constituent les principaux points de fuite d'énergie dans la salle blindée.

A l'intérieur de la salle blindée, les éléments conducteurs extérieurs du boîtier du matériel et les câbles blindés forment la troisième barrière de ce système hypothétique. Comme auparavant, l'énergie EM peut pénétrer dans ces boîtiers intérieurs par des éléments de pénétration conducteurs, des ouvertures et par diffusion. De plus, une pénétration d'énergie au travers de câbles tressés et de connecteurs peut se produire sur les lignes reliant les différentes enceintes de matériel internes.

L'annexe A décrit des concepts d'essai pour les perturbations conductrices et pour les perturbations rayonnées. Le présent article décrit diverses méthodes d'essais des mesures de protection contre l'environnement IEMN-HA rayonné uniquement. Ces essais impliquent la production directe de champs EM agissant sur des enceintes ou blindages de matériel, ou l'injection de courant et de charge sur des blindages, dans le but de simuler l'interaction de champs rayonnés au niveau des structures. Cet article fournit également une brève introduction aux concepts et techniques d'essai IEMN-HA concernant les perturbations de champ rayonné. Les procédures d'essai spécifiques sont présentées à l'article 5.

4.1 Essais sur enceinte de blindage

Le comportement des enceintes de protection peut être caractérisé de diverses manières. Ci-dessous, divers concepts d'essai servant à décrire le comportement des éléments de blindage individuels en question sont examinés. La manière dont l'élément de protection fonctionne dans la séquence d'interactions globale, conduisant à la réaction finale du système vis-à-vis de l'IEMN-HA, n'est pas considérée ici. Les aspects d'évaluation détaillée du système, appelés essais «fumée» ou contrôle rapide et les questions de perturbation du système, qui se fondent sur l'observation de l'ensemble des effets de niveaux de système, ne sont pas non plus considérés; il convient de consulter l'annexe A pour plus d'informations concernant ces types d'essai IEMN-HA. Ce sont plutôt les méthodes d'essai utilisées pour vérifier les niveaux de protection fournis par des composants de blindage individuels intégrés au système qui seront examinées, ainsi que des indications concernant les valeurs à mesurer dans le cadre de ces essais.

Fonctions de transfert de champ

On obtient une mesure commune du blindage en étudiant l'intensité du champ EM intérieur par rapport à l'intensité du champ EM extérieur d'*excitation* (c'est-à-dire le champ hors bâtiment). Les environnements EM intérieurs et extérieurs pouvant être définis en termes de champ E ou de champ H et ces champs étant des grandeurs *vectérielles*, un grand nombre de combinaisons de champ est possible. De plus, ces champs, par leur nature, sont variables dans le temps en raison de la nature transitoire de la menace IEMN-HA.

As an example, a hypothetical case of a building containing a highly shielded screen room is considered. Inside the screen room, it is assumed that there are several equipment enclosures, linked together by shielded cables and connectors. The first shielding surface in this system is the building enclosure. Depending on the type of building, this may or may not provide significant shielding for the interior volume. Large apertures in the form of doors and windows, as well as conducting penetrations for electrical power and communications lines, may be present. Tests of these individual penetration mechanisms shall be required to evaluate the shielding provided by this enclosure.

Inside the building, the HEMP field is attenuated somewhat by the building walls or enclosure. Thus, the electrical disturbance experienced by the internal screen room is lower than that of the ambient external HEMP field. Because the internal shielded room is specifically designed to reduce the EM fields inside, it is expected that it will function properly – if the various protection devices applied to the shield penetrations are operational. Field penetration through cracks and joints in the walls, diffusion through the shield material and conductive penetrations along signal wires are the main pathways for energy to leak into the shielded room.

Inside the screen room, the conducting exteriors of the equipment housing and the shielded cables form the third barrier in this hypothetical system. As before, the EM energy is able to penetrate into these internal boxes by conductive penetrations, aperture penetrations and by diffusion. Moreover, energy penetration through braided cables and cable connectors may occur on the lines linking the various internal equipment enclosures.

Annex A describes test concepts for both conductive and radiated disturbances. In this clause, various methods are described for testing protective measures against the radiated HEMP environment only. These tests involve the direct generation of EM fields acting on equipment enclosures or shields, or the injection of current and charge onto shields to simulate the radiated field interaction to the structures. In the remainder of this clause, a brief introduction into the various HEMP test concepts and techniques for radiated field disturbances are reviewed. The specific test procedures are presented in clause 5.

4.1 Testing of shielding enclosures

There are several different ways of characterizing the behaviour of protective enclosures. Below, various test concepts are examined that serve to describe the shielding behaviour of the individual shielding elements in question. The issue of how the protective element functions in the overall interaction sequence, leading up to the final system response to HEMP, is not dealt with here. Neither are the aspects of a detailed system assessment, so-called "smoke" (e.g., burnout), go-no-go testing, or system upset issues, which rely on observing overall system-level effects. Annex A should be consulted for more information regarding these types of HEMP tests. Instead, test methods for verifying the protection levels provided by individual shielding components within the system will be examined and indication given as to what should be measured in the tests.

Field transfer functions

A common measure of shielding is obtained by examining the strength of the internal EM field relative to the intensity of the external excitation EM field (i.e. the field with the building removed). Because the external and internal EM environments can be defined in terms of either the *E*-field or the *H*-field, and because these fields are vector quantities, a large number of field combinations is possible. Moreover, these fields are time-varying in nature, due to the transient nature of the HEMP threat.

En ce qui concerne les champs intérieurs et extérieurs à décomposer en spectres fréquentiels, une mesure de l'atténuation fournie par le bâtiment est possible grâce à la fonction de transfert de champ $T(\omega)$, représentée par le rapport de grandeurs de champ sélectionnées de façon adéquate comme suit:

$$T(\omega) = \frac{A_{in}(\omega)}{A_{out}(\omega)} \quad (1)$$

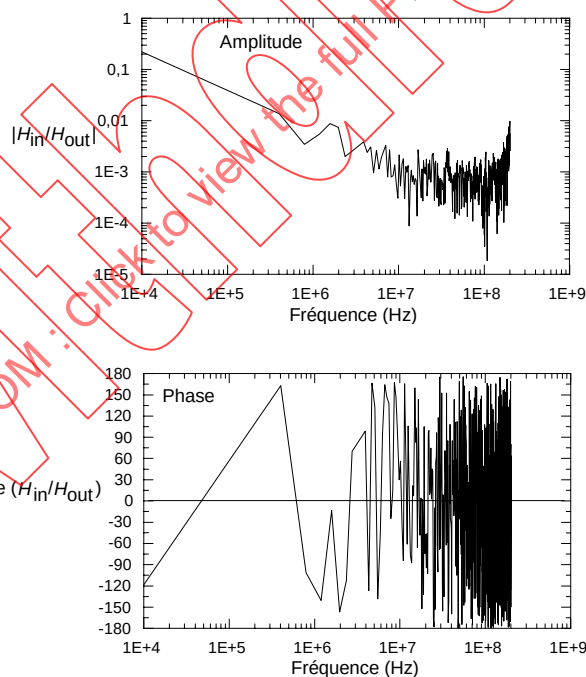
où

A_{out} représente la composante spectrale d'une composante vectorielle particulière de l'un ou l'autre des champs d'excitation E et H à l'extérieur de l'installation;

A_{in} représente une composante de E ou H à l'intérieur du bâtiment.

En fonction du choix des champs intérieurs et extérieurs, ce rapport peut être sans dimension ou présenter des dimensions d'impédance (en ohms) ou d'admittance (en siemens).

La fonction de transfert de champ dans l'équation (1) est une grandeur complexe, présentant à la fois une amplitude et une phase. La figure 1 présente un exemple de fonction de transfert entre le champ magnétique d'excitation externe et le champ magnétique interne, mesurée pour une enceinte blindée. Si l'on doit déterminer une représentation précise des champs transitoires intérieurs à partir des mesures de $T(\omega)$, les deux grandeurs doivent être mesurées. Si l'on souhaite uniquement une indication relative de l'atténuation en fonction de la fréquence pour le bâtiment, il suffit de mesurer l'amplitude $|T(\omega)|$.



IEC 1701/2000

Figure 1 – Exemple de fonction de transfert $T(\omega) = H_{in}/H_{out}$ mesurée (amplitude et phase) pour une enceinte blindée

Considering the internal and external fields to be decomposed into their frequency-domain spectra, a measure of the attenuation provided by the building is provided by the field transfer function $T(\omega)$ which is the ratio of suitably chosen field quantities as

$$T(\omega) = \frac{A_{in}(\omega)}{A_{out}(\omega)} \quad (1)$$

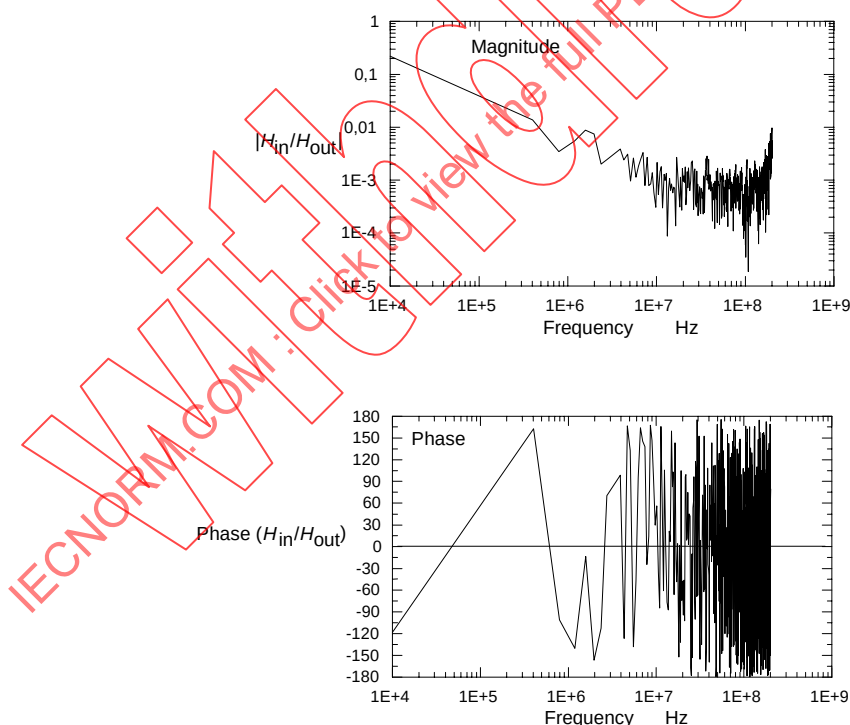
where

A_{out} represents the spectral component of a particular vector component of either the E or H excitation field outside the facility; and

A_{in} represents a component of either E or H inside the building.

Depending on the choice of the internal and external fields, this ratio can be dimensionless or have dimensions of an impedance (in ohms) or an admittance (in siemens).

The field transfer function in equation (1) is a complex valued function, having both a magnitude and phase. An illustration of a measured transfer function between the external excitation and the internal H -fields for a sample shielding enclosure is illustrated in figure 1. If an accurate representation of the internal transient fields is to be determined from measurements of $T(\omega)$, both quantities shall be measured. If only a relative indication of the attenuation as a function of the frequency is desired for the building, then it is sufficient to measure only the magnitude $|T(\omega)|$.



IEC 1701/2000

Figure 1 – Example of measured magnitude and phase of the transfer function $T(\omega) = H_{in}/H_{out}$ for a shielded enclosure

Efficacité de blindage

L'efficacité de blindage d'une installation est étroitement liée à la fonction de transfert de blindage évoquée ci-dessus, dans la mesure où elle établit une comparaison entre les amplitudes relatives de deux composantes de champ similaires dans le domaine fréquentiel. Cependant, cette grandeur contient moins d'informations car les informations de phase font défaut. L'efficacité de blindage de l'enceinte est définie par la formule suivante:

$$SE_A = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{|T_A(\omega)|} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

où A_{out} et A_{in} représentent des grandeurs de champ E ou H extérieur et intérieur adaptées. Ainsi, cette valeur dépend étroitement du tracé d'amplitude de la fonction de transfert relative aux champs.

En raison des différences fondamentales au niveau des mécanismes de blindage électriques et magnétiques à basse fréquence, l'efficacité de blindage vis-à-vis des champs électriques, signalée par SE_E , et l'efficacité de blindage vis-à-vis des champs magnétiques, SE_H , sont largement différentes à basse fréquence. La figure 2 illustre le blindage théorique fourni par un corps en aluminium fermé d'épaisseur égale à 0,5 mm. Cette figure illustre le fait qu'à fréquence élevée (supérieure à environ 1 MHz), les paramètres d'efficacité de blindage sont approximativement identiques pour les deux champs. Généralement, SE_H est inférieure à SE_E à basse fréquence (en dessous de 100 kHz), car le champ magnétique à basse fréquence peut se diffuser au travers des parois de l'enceinte de protection plus facilement que le champ électrique. C'est pour cette raison que, souvent, on utilise uniquement l'efficacité de blindage d'une enceinte au champ magnétique pour caractériser une enceinte.

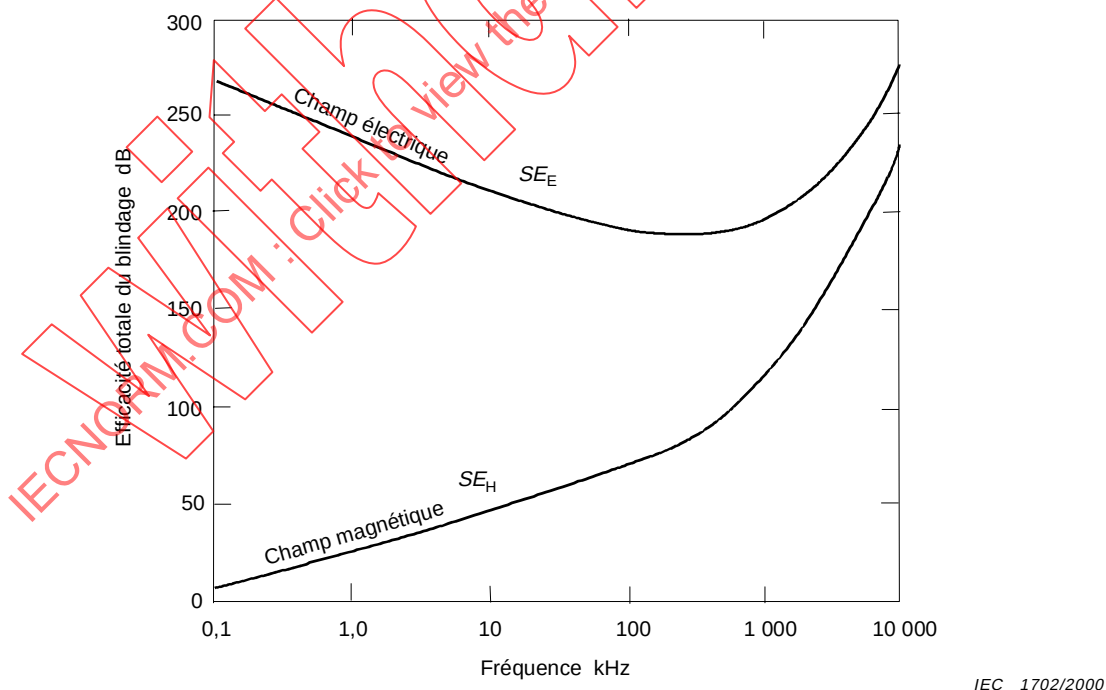


Figure 2 – Efficacité de blindage pour champ électrique et champ magnétique dans une enceinte en aluminium de 0,5 mm d'épaisseur [28] ¹⁾

¹⁾ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

Shielding effectiveness

The shielding effectiveness of a facility is closely related to the shield transfer function discussed above in that it compares the relative magnitudes of two similar field components in the frequency domain. However, this quantity contains less information because the phase information is lacking. Shielding effectiveness of the enclosure is defined as follows:

$$SE_A = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{|T_A(\omega)|} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

where A_{out} and A_{in} represent suitable external and internal E or H field quantities. Thus, it is closely related to the magnitude plot of the transfer function for the fields.

Because of the fundamental differences in electric and magnetic shielding mechanisms at low frequencies, the shielding effectiveness for electric fields, denoted by SE_E , and for magnetic fields, SE_H , are significantly different at low frequencies. Figure 2 illustrates the theoretical shielding provided by a closed aluminium shell of a thickness of 0,5 mm. This figure illustrates the fact that for frequencies about 1 MHz, the shielding effectiveness parameters for both fields are about the same. Generally, SE_H is less than SE_E at low frequencies (below 100 kHz), due to the fact that the low-frequency magnetic field is able to diffuse through the protective enclosure walls more easily than does the electric field. It is for this reason that often just the magnetic field shielding effectiveness of an enclosure is used to characterize an enclosure.

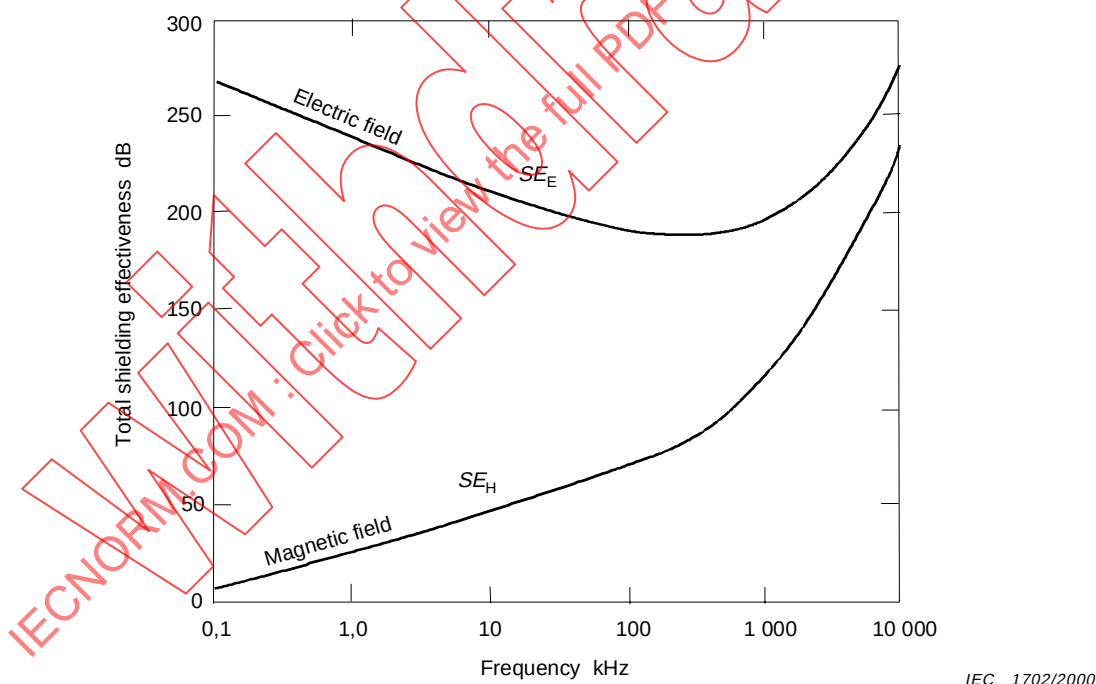


Figure 2 – The electric field and magnetic field shielding effectiveness of a 0,5 mm thick aluminium enclosure [28] ¹⁾

¹⁾ Figures in square brackets refer to the bibliography.

La figure 3 fournit un autre exemple de l'efficacité de blindage de champ magnétique mesurée pour une enceinte réelle et illustre le comportement de SE_H par des mesures réalisées pour un bâtiment identique à celui de la figure 1. Il convient de noter que le blindage présente plusieurs valeurs maximales et valeurs nulles, correspondant aux résonances internes et externes de l'enceinte, ainsi que des pénétrations dépendant de la fréquence venant s'ajouter à la simple pénétration diffusive des champs au travers du matériau de blindage.

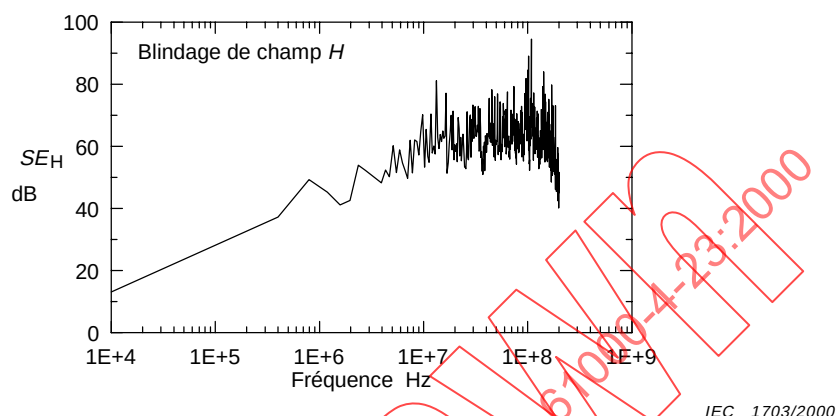


Figure 3 – Efficacité de blindage de champ magnétique mesurée SE_H pour un bâtiment

4.1.1 Bâtiments

Pour un bâtiment tel que celui illustré à la figure 4, la réponse interne induite par l'IEMN-HA provient principalement des pénétrations conductrices et d'ouverture. Ainsi, il convient d'exciter correctement ces éléments de pénétration dans le cadre des essais de blindage de l'enceinte. La pénétration du champ par diffusion au travers du blindage global (par exemple les parois de l'enceinte) est généralement faible.

Le concept d'essai IEMN-HA relatif aux bâtiments physiquement plus grands implique la simulation de champs à l'extérieur de l'objet d'essai (voir la présentation des divers emplacements d'interface d'essai à la figure A.1.) Pour cette excitation, il est nécessaire de mesurer une réponse interne adaptée produite par ce champ extérieur.

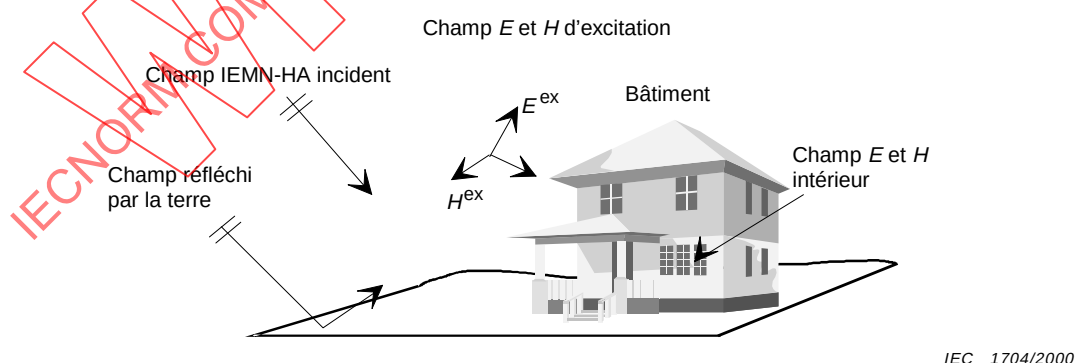


Figure 4 – Illustration conceptuelle de l'essai IEMN-HA d'un bâtiment

A l'extérieur du bâtiment, le champ d'excitation IEMN-HA simulé est exprimé par les paramètres suivants (voir CEI 61000-2-9):

- caractéristiques de forme d'onde du champ incident (plus champ réfléchi par le sol, le cas échéant) (telles que l'amplitude, le temps de montée et le temps de descente);
- polarisation du champ d'excitation;
- proportion du système extérieur illuminée par le champ simulé.

As a further example of the measured magnetic field shielding effectiveness of a real enclosure, figure 3 illustrates the behaviour of SE_H as measured for the same building discussed in figure 1. It should be noted that the shielding has several peaks and nulls, corresponding to internal and external resonances of the enclosure, as well as frequency-dependent penetrations that occur in addition to the simple diffusive penetration of fields through the shield material.

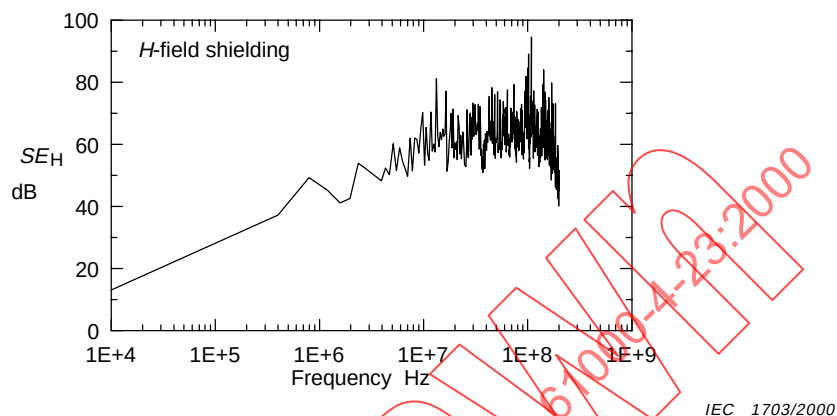


Figure 3 – Measured magnetic field shielding effectiveness SE_H for a building

4.1.1 Buildings

For a building such as that illustrated in figure 4, the internal HEMP-induced response arises mainly from conductive and aperture-type penetrations. Thus, any test of the enclosure shielding should strive to adequately excite these penetrations. The field penetration by diffusion through the global shield (i.e. the walls of the enclosure) is generally small.

The HEMP test concept for physically large buildings requires the simulation of fields on the exterior of the test object (see the discussion of the various test interface locations in figure A.1). For this excitation, the measurement of a suitable internal response induced by this external field is needed.

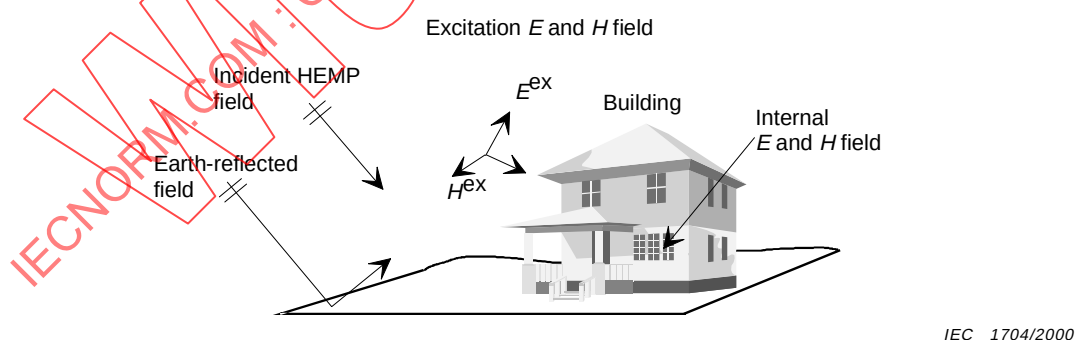


Figure 4 – Conceptual illustration of the HEMP test of a building

On the exterior of the building, the simulated HEMP excitation field is expressed by the following parameters (see IEC 61000-2-9):

- the incident field (plus ground-reflected field, if any) waveform characteristics (such as its amplitude, rise time, and fall time);
- the excitation field polarization;
- the amount of the system exterior illuminated by the simulated field.

Des informations concernant la méthode de production ou d'approximation de ce champ extérieur sont présentées en 5.1.

On peut sélectionner différents types de réponses internes pour décrire le blindage de l'enceinte de l'installation. Parmi eux, on distingue les champs internes E ou H , ou la tension et le courant induits sur les conducteurs internes. Par conséquent, différentes mesures de blindage peuvent exister pour un système particulier. De plus, l'emplacement du point d'observation intérieur peut varier, donnant lieu à d'importantes variations des indices de mérite du blindage.

4.1.2 Abris et salles

Dans le cas d'un abri ou d'une salle blindée, on suppose que l'environnement IEMN-HA simulé est toujours appliqué à l'extérieur de l'enceinte, là où les champs IEMN-HA incidents sont censés fournir la plus grande excitation à la structure. Par conséquent, les concepts d'essai pour ces enceintes sont similaires aux concepts relatifs aux bâtiments plus grands. Ces enceintes plus petites peuvent aussi être caractérisées par:

- une fonction de transfert de champ à valeur complexe, ou
- une efficacité de blindage.

Il convient cependant de garder à l'esprit que des signaux transitoires seront également conduits dans cette installation sur les lignes d'alimentation et qu'il faut les traiter séparément, conformément à la CEI 61000-5-3.

La principale différence entre les bâtiments et les abris ou les salles blindées est que les niveaux de protection IEMN-HA fournis par les enceintes plus petites sont largement supérieurs, car elles sont spécifiquement conçues pour fournir un degré de blindage élevé. Par conséquent, les niveaux de signaux internes sont généralement inférieurs aux niveaux existant dans les bâtiments. Les mesures sont donc plus sensibles au bruit. De plus, du fait de la taille réduite, les effets de la résonance de cavité interne se feront sentir à des fréquences plus élevées. Par conséquent, les concepts de blindage quasistatiques sont applicables à une gamme plus large de fréquences pour ces enceintes (voir CEI 61000-5-3).

La figure 5 illustre une salle blindée générique possédant plusieurs plaques collectrices de la barrière de blindage identifiée.

NOTE Les pénétrations conductrices d'alimentation et de transmission ne sont pas illustrées, car elles font l'objet d'une description distincte dans la CEI 61000-4-25.

La caractérisation de l'ensemble du blindage de la barrière par une fonction de transfert de champ $T(\omega)$, ou par l'efficacité de blindage SE , fournit une mesure globale des effets de pénétration à partir de tous les mécanismes de pénétration indiqués à la figure 5. C'est-à-dire que les champs intérieurs sont produits par les pénétrations de toutes les plaques collectrices réunies, ainsi que la diffusion au travers du matériau dans les parois du blindage. On dispose d'autres techniques de mesure pour caractériser la protection fournie par les pénétrations individuelles (telles que joints, conduit de ventilation, conduit blindé, etc.); elles sont étudiées en 4.3.

Details of how this external field may be produced or approximated are presented in 5.1.

Different types of internal responses can be chosen to describe the shielding of the facility enclosure. These include the internal E or H fields or the induced voltage and current on internal conductors. Consequently, different measures for the shielding can be generated for any particular system. Moreover, the location of the internal observation point can vary, again giving rise to wide variations of shielding figures of merit.

4.1.2 Shelters and rooms

For a shelter or a shielded room, we assume that the simulated HEMP environment is still being applied to the exterior of the enclosure where the incident HEMP fields are assumed to provide the main excitation to the structure. Consequently, the test concepts for these enclosures are similar to those for large buildings. These smaller enclosures can again be characterized by either

- a complex-valued field transfer function, or
- a shielding effectiveness.

It should be kept in mind, however, that there will also be transient signals conducted into this facility on power lines, and these must be addressed separately, as discussed in IEC 61000-5-3.

The main difference between large buildings and shelters or shielded rooms is that the HEMP protection levels provided by these smaller enclosures will be significantly higher, since they are specifically designed to provide a high degree of shielding. Consequently, the internal signal levels are usually smaller than in the case of buildings. This makes the measurements more susceptible to noise. In addition, due to the smaller size, the effects of internal cavity resonances will occur at higher frequencies. As a result, quasi-static shielding concepts are applicable over a wider range of frequencies for these enclosures (see IEC 61000-5-3).

Figure 5 illustrates a generic shielded room with several PoEs of the shielding barrier identified.

NOTE Power and signal conducting penetrations are not illustrated, as they are considered separately in IEC 61000-4-25.

Characterizing the overall barrier shielding by a field transfer function $T(\omega)$, or by shielding effectiveness SE , provides a global measure of the penetration effects from all of the penetration mechanisms indicated in figure 5. That is to say, the internal fields arise from the penetrations from all of the PoEs taken together, along with the diffusion through the material in the walls of the shield. Alternate measurement techniques are available for characterizing the protection provided by the individual penetrations (such as the gasket, air vent, shielded conduit, etc.) and these are discussed in 4.3.

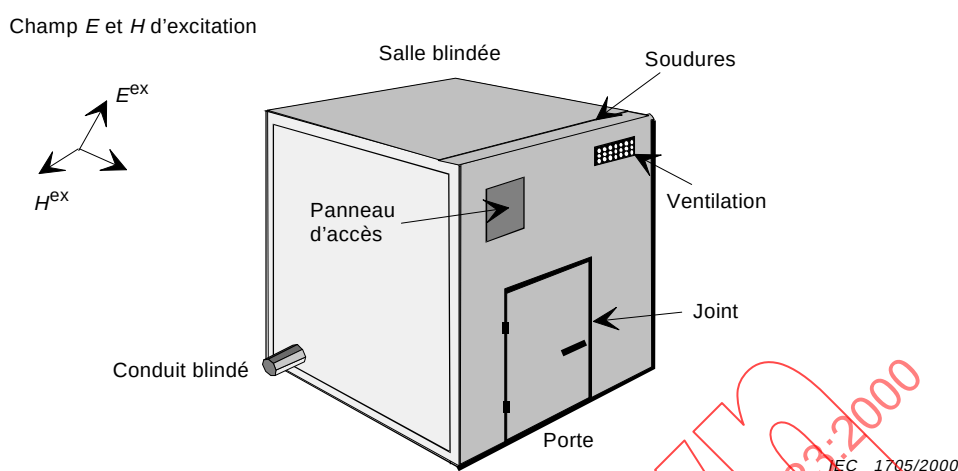


Figure 5 – Illustration d'une salle ou d'une enceinte blindée, excitée par des champs IEMN-HA

4.1.3 Coffrets, casiers et boîtiers

Ces enceintes sont généralement situées dans une barrière EM existante, qui modifie de façon importante l'environnement de champ magnétique excitant le système. Un boîtier interne ou un coffret est excité par une combinaison du champ EM interne et de courants injectés sur des blindages de câble issus d'autres matériels, également excités par les champs locaux. Une illustration est fournie à la figure 6.

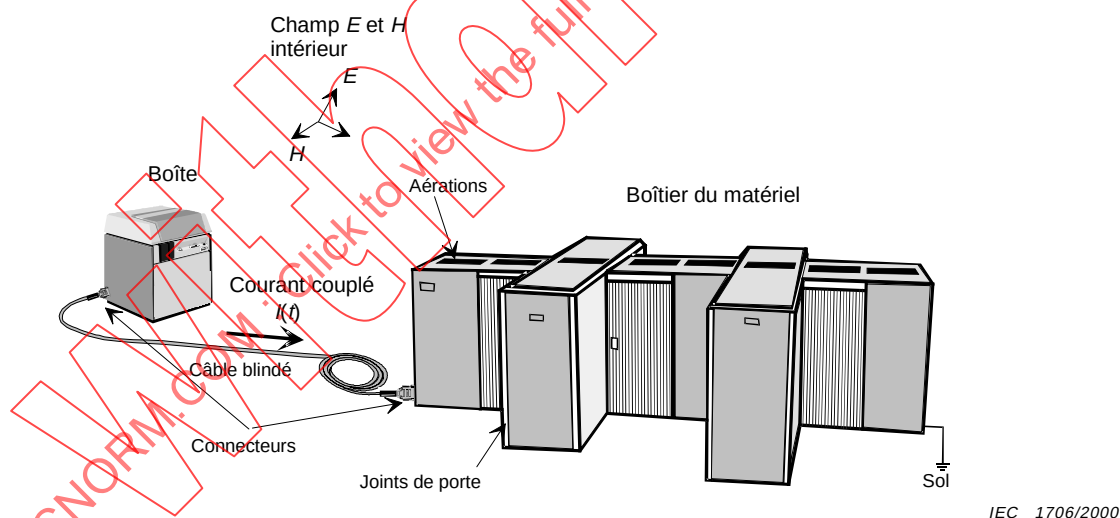


Figure 6 – Illustration de casiers, coffrets et boîtiers excités par une contrainte IEMN-HA interne

Essai d'illumination de champ

Pour les essais réalisés sur les enceintes impliquant les champs EM à l'intérieur d'une enceinte plus grande, le concept précédent d'illumination de champ peut être adopté pour mesurer le blindage global fourni par le matériel. Comme auparavant, ce blindage peut être caractérisé par:

- une valeur de transfert de champ à valeur complexe, ou
- une efficacité de blindage de l'enceinte.

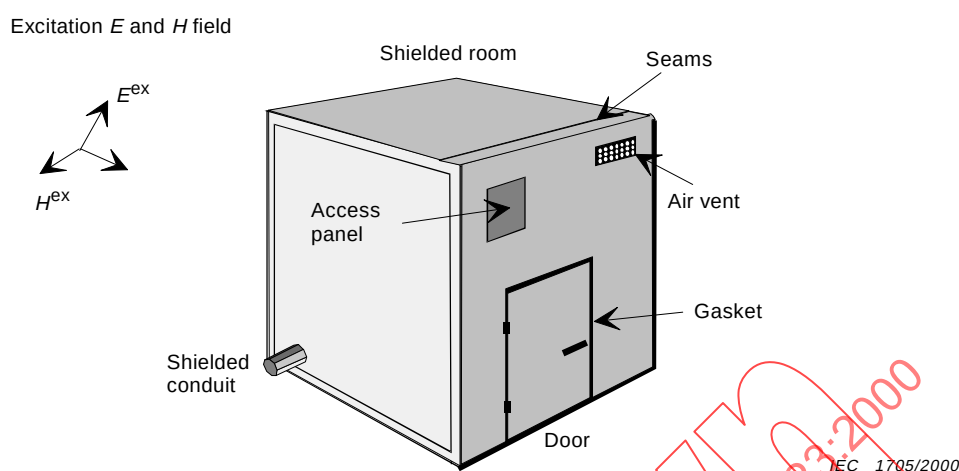


Figure 5 – Illustration of a shielded room or enclosure excited by HEMP fields

4.1.3 Cabinets, racks and boxes

These enclosures are typically located within an existing EM barrier, which significantly modifies the electromagnetic field environment exciting the system. An internal box or an equipment cabinet is excited by a combination of the internal EM field plus injected currents on cable shields coming from other equipment that have also been excited by the local fields. This is illustrated in figure 6.

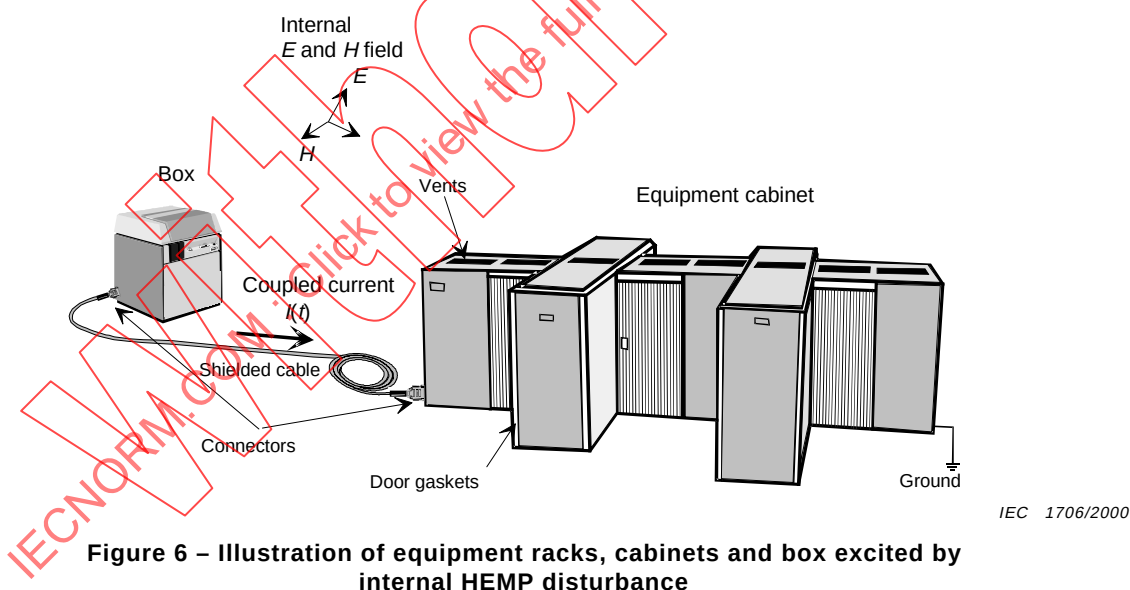


Figure 6 – Illustration of equipment racks, cabinets and box excited by internal HEMP disturbance

Field illumination test

For tests of these enclosures involving the EM fields inside a larger enclosure, the previous concept of field illumination can be adopted to measure the global shielding provided by the equipment. As before, this shielding may be characterized by

- a complex-valued field transfer function, or
- a shielding effectiveness of the enclosure.

En raison de la taille plus réduite de ces enceintes, des difficultés de mesure provenant de l'emballage intérieur compact des composants électroniques internes peuvent cependant se poser. Ainsi, il est souvent difficile de localiser des capteurs de champ EM adaptés à l'intérieur du coffret. En outre, les essais étant réalisés à la surface du boîtier ou de l'enceinte, il existe d'importantes incertitudes au niveau de la caractérisation de l'environnement du champ IEMN-HA. Finalement, l'interconnexion entre les différents éléments du matériel peut être relativement complexe et, si l'on pratique des essais sur un boîtier ou un casier simple, sa réponse mesurée peut différer considérablement de celle enregistrée lorsqu'il est raccordé au reste du système. L'article 5 fournit des précisions sur les essais de champ pratiqués sur ces enceintes.

Impédance de transfert de blindage

Il est possible également, pour remplacer les essais de champ pratiqués sur les boîtiers et les petites enceintes, d'appliquer le concept d'impédance de transfert de l'enceinte; voir l'annexe E. Il est similaire au traitement d'un câble blindé étudié en 4.2 et implique de pratiquer des essais sur une interface au niveau du boîtier dans le système. Dans ce cas, un courant $I(t)$ est injecté à la surface du boîtier ou du casier et une tension en circuit ouvert $V_{oc}(t)$ est mesurée sur un câble de détection interne adapté. Dans ce type d'essai, il est important de s'assurer que le courant injecté circule à l'extérieur du boîtier de la même manière que lorsque le boîtier est raccordé au reste du système. Cela implique que le point de sortie du courant (raccordement à la masse) doit être maintenu, de façon à pouvoir supprimer le courant injecté correctement.

La figure 7 illustre une enceinte blindée générale excitée par une injection de courant extérieure. A l'intérieur du corps, aux points a et b , un câble de détection est raccordé au blindage, et la tension en circuit ouvert V_{oc} est mesurée. L'impédance de transfert de cette enceinte est une grandeur de valeur complexe, définie en termes de composantes spectrales fréquentielles $I(\omega)$ et $V_{oc}(\omega)$, selon la formule:

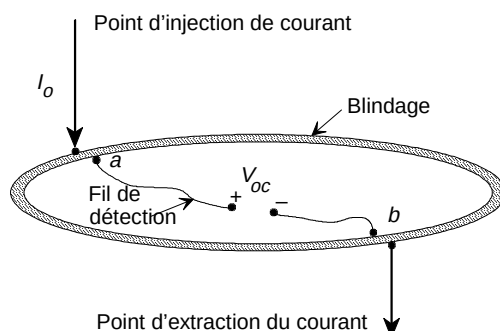
$$Z_t(\omega) = \frac{V_{oc}(\omega)}{I(\omega)} \quad (3)$$

où

$I(\omega)$ est le courant injecté, et

$V_{oc}(\omega)$ est la tension en circuit ouvert mesurée sur le conducteur de mesure.

Cette valeur d'impédance de transfert de blindage varie, en fonction de l'emplacement des bornes à l'intérieur de l'enceinte, pour la détermination de la tension en circuit ouvert. Pour déterminer correctement le blindage fourni par l'enceinte dans son ensemble, il convient de situer les points de mesure de tension à l'intérieur de l'enceinte, à proximité des points d'injection de courant.



IEC 1707/2000

Figure 7 – Blindage général excité par une injection de courant

Due to the smaller size of these enclosures, however, difficulties in this measurement can arise from the dense internal packing of internal electronic components. Often this makes it difficult to locate suitable EM field sensors inside the box. Furthermore, because the testing is conducted on the box or enclosure surface, there are large uncertainties in the characterization of the HEMP field environment. Finally, the interconnection between the various equipment items can be rather complex, and if a single box or equipment rack is tested, its measured response may be considerably different from that found when it is connected to the rest of the system. Details of the field testing of these enclosures is provided in clause 5.

Shield transfer impedance

An alternative to the field testing of boxes and small enclosures is to use the concept of a transfer impedance of the enclosure, see annex E. This is similar to the treatment of a shielded cable discussed in 4.2, and involves testing at a box level interface in the system. In this case, a current $I(t)$ is injected onto the surface of the box or rack, and an open-circuit voltage $V_{oc}(t)$ on a suitable internal sense wire is measured. In this form of testing, it is important to ensure that the injected current flows over the exterior of the box in the same way as when the box is connected to the rest of the system. This implies that the current exit point (the ground connection) has to be maintained so that the injected current can be removed properly.

Figure 7 illustrates a general shielded enclosure excited by an external current injection. Just inside the shell at points a and b , a sense wire is connected to the shield, and the open-circuit voltage V_{oc} is measured. The transfer impedance of this enclosure is a complex valued quantity, defined in terms of the frequency domain spectral components as

$$Z_t(\omega) = \frac{V_{oc}(\omega)}{I(\omega)} \quad (3)$$

where

$I(\omega)$ is the injected current, and

$V_{oc}(\omega)$ is the measured open-circuit voltage on the sense wire.

This shield transfer impedance value varies, depending on the location of terminals inside the enclosure for determining the open-circuit voltage. For adequate sensing of the shielding provided by the entire enclosure, the voltage sense points should be located within the enclosure, near the current injection locations.

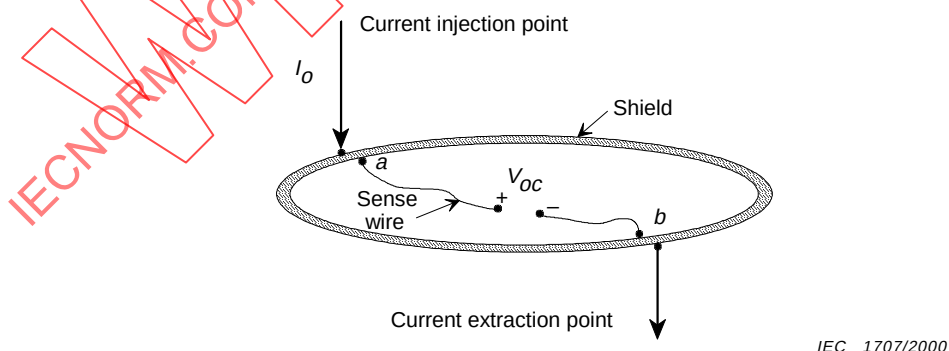


Figure 7 – A general shield excited by current injection

L'impédance de transfert du blindage est fonction des propriétés électriques du matériau de blindage (conductivité σ et perméabilité μ), ainsi que des dimensions du blindage et de la nature des éventuelles imperfections de l'enceinte telles que des bavures de joint, ouvertures, etc. Dans le cas particulier d'un blindage sphérique mince de rayon a et d'épaisseur Δ ne présentant aucune pénétration d'ouverture, il est possible de calculer l'efficacité de blindage de champ SE_H en fonction de l'impédance de transfert de blindage Z_t et de la résistance en c.c. du blindage par unité, R' , grâce à la relation:

$$SE_H = 20 \log_{10} \left| \frac{\left(\frac{a}{\Delta} (\gamma \Delta)^2 \right)}{3 \frac{Z_t}{R'}} \right| \quad (4)$$

où

a est le rayon d'un blindage mince sphérique (en m);

Δ est l'épaisseur du blindage (en m);

γ est la constante de propagation dans le matériau de blindage, donnée par $\gamma \approx \sqrt{j\omega\mu\sigma}$;

σ est la conductivité électrique du matériau du blindage (en S/m);

μ est la perméabilité magnétique du matériau du blindage (en F/m);

Z_t est l'impédance de transfert du blindage (en Ω/m);

R' est la résistance en c.c. par unité de longueur du blindage (en Ω/m).

4.2 Essais de câbles et connecteurs blindés

Des câbles blindés sont fréquemment utilisés pour transmettre des informations entre des matériels situés dans deux enceintes de protection. On peut ainsi définir deux lignes de transmission distinctes: une ligne externe par laquelle les courants et charges circulent à l'extérieur du câble, en même temps qu'un éventuel retour au plan de masse, et une ligne interne incluant les conducteurs à l'intérieur du blindage. Les champs IEMN-HA peuvent exciter la ligne de transmission externe et, si le blindage du câble est imparfait, certains courants et charges extérieurs peuvent pénétrer au travers du blindage et exciter la ligne interne, ce qui provoque une réponse parasite au niveau du matériel «protégé». Les concepts d'essai relatifs à ce mécanisme de couplage sont examinés dans le présent paragraphe.

L'annexe B résume les principaux aspects de caractérisation d'un blindage de câble. Celle-ci implique deux paramètres: l'impédance de transfert de blindage et l'admittance de transfert. Pour la plupart des blindages de câble pratiques, l'impédance de transfert est une fonction à valeur complexe, dépendante de la fréquence, décrite de façon réelle et fictive, ou par une fonction d'amplitude et de phase. L'admittance de transfert, cependant, est avant tout réactive et est effectivement déterminée par une capacité indépendante de la fréquence.

Tandis que l'impédance de transfert est uniquement fonction des propriétés de blindage, l'admittance de transfert dépend à la fois du blindage et de la configuration de la ligne de transmission externe. Il est possible, cependant, de présenter un paramètre d'admittance de transfert mesuré sous une autre forme: le paramètre de fuite du blindage, *indépendant* du circuit externe. L'article 4 traite des méthodes d'essai relatives aux grandeurs d'impédance et d'admittance de transfert, tout en gardant à l'esprit que cette dernière grandeur dépend des particularités du circuit externe, telles que la hauteur de ligne externe, le rayon du fil et la nature du plan de masse local à proximité du câble.

The shield transfer impedance is a function of the electrical properties of the shielding material, as well as the shield dimensions and the nature of any imperfections in the enclosure such as seams, apertures, etc. In the special case of a thin spherical shield in which there are no aperture penetrations, it is possible to calculate the H -field shielding effectiveness SE_H , given the shield transfer impedance and the d.c. resistance of the shield through the relationship:

$$SE_H = 20 \log_{10} \left| \frac{\left(\frac{a}{\Delta} (\gamma \Delta)^2 \right)}{3 \frac{Z_t}{R'}} \right| \quad (4)$$

where

a is the radius of a thin spherical shield (in m);

Δ is the thickness of the shield (in m);

γ is the propagation constant in the shielding material, given by $\gamma \approx \sqrt{j\omega\mu\sigma}$;

σ is the electrical conductivity of the shield material (in S/m);

μ is the magnetic permeability of the shield material (in F/m);

Z_t is the shield transfer impedance (in Ω/m);

R' is the per unit length d.c. resistance of the shield (in Ω/m).

4.2 Testing of shielded cables and connectors

Shielded cables are frequently used to transmit information between equipment contained within two protective enclosures. As such, one can define two distinct transmission lines: an external line having currents and charges flowing on the exterior of the cable, together with a possible ground-plane return, and an internal line consisting of the conductors inside the shield. HEMP fields can excite the external transmission line, and if the cable shield is imperfect, some of the external currents and charges can penetrate through the shield and excite the internal line. This leads to an unwanted response in the "protected" equipment. In this subclause, test concepts for this coupling mechanism are examined.

Annex B summarizes important aspects of the characterization of a cable shield. This involves two parameters: the shield transfer impedance and the transfer admittance. For most practical cable shields, the transfer impedance is a complex valued, frequency-dependent function, described by real and imaginary parts, or equivalently, by a magnitude and phase function. The transfer admittance, however, is primarily reactive, and is effectively modelled by a frequency-independent capacitance.

While the transfer impedance is a function only of the shield properties, the transfer admittance depends on both the shield and the configuration of the external transmission line. It is possible, however, to present the measured transfer admittance parameter in another form: that of the shielding leakage parameter, which is independent of the external circuit. Clause 4 considers test methods for the transfer impedance and admittance quantities, keeping in mind that the latter quantity depends on the details of the external circuit, such as the external line height, wire radius, and nature of the local ground plane near the cable.

4.2.1 Essais de blindage de câble

Détermination de l'impédance de transfert

Bien qu'il existe de nombreuses configurations d'essai différentes pour la mesure de l'impédance de transfert d'un blindage de câble, celles-ci sont toutes reliées à la configuration de base illustrée à la figure 8. Une source de tension externe V_s alimente ici l'extrémité $x = 0$ d'un blindage de câble de longueur L raccordé à la masse (c'est-à-dire le conducteur de référence) par un court-circuit à l'extrémité opposée du câble. La résistance Z_s à la source limite la circulation de courant à l'extérieur du câble.

Le conducteur interne (coaxial) du câble blindé est mis en court-circuit avec le blindage au niveau de l'extrémité $x = L$ de la ligne, et la tension en circuit ouvert, V_i , est mesurée à l'extrémité $x = 0$. En partant de l'hypothèse:

- que les lignes de transmission internes et externes sont électriquement courtes ($L \ll \lambda$), et
- qu'il existe une excitation de champ négligeable au niveau du câble interne en raison des champs pénétrant par les extrémités de la ligne,

on peut obtenir une approximation de l'impédance de transfert dépendante de la fréquence du blindage de câble en appliquant l'équation (B.5a) comme suit:

$$Z'_t(\omega) = R'_t(\omega) + j X'_t(\omega) \approx \frac{V_i}{I_e L} \approx \frac{Z_s}{L} \frac{V_i}{V_s} \quad \Omega/\text{m} \quad (5)$$

où

Z'_t est l'impédance de transfert du câble (en Ω/m);

ω est la pulsation (en $2\pi \times \text{Hz}$);

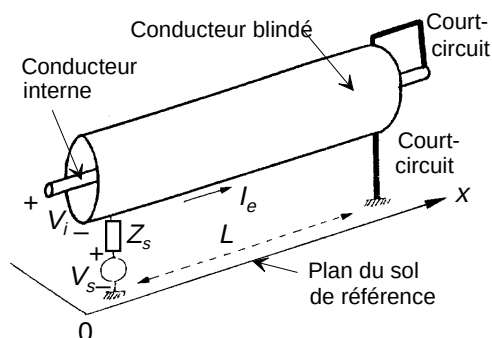
V_i est la tension interne en circuit ouvert entre le conducteur interne et la gaine du câble;

V_s est la tension qui excite le circuit externe du blindage du câble (en V);

L est la longueur du blindage du câble (en m);

Z_s est l'impédance de la source de tension externe (en Ω).

Pour appliquer ces formules, il est très important de s'assurer que la ligne est électriquement courte. A mesure que la fréquence augmente, la répartition du courant sur le câble extérieur commence à présenter des valeurs nulles et des valeurs crêtes périodiques dues aux réflexions de l'extrémité court-circuitée de la ligne. De plus, on relève la présence de réflexions internes provenant du court-circuit sur le câble intérieur. Ces oscillations sont à l'origine d'erreurs importantes dans la mesure de l'impédance de transfert à haute fréquence.



IEC 1708/2000

Figure 8 – Configuration de base pour la mesure de l'impédance de transfert

4.2.1 Testing of cable shields

Determination of the transfer impedance

Although there are several different test configurations for measuring the transfer impedance of a cable shield, they are all related to the basic configuration shown in figure 8. An external voltage source V_s feeds the $x = 0$ end of a cable shield of length L which is connected to the ground (i.e. the reference conductor) through a short-circuit at the opposite end of the cable. The resistance Z_s at the source limits the current flowing in the cable exterior.

The inner (coaxial) conductor of the shielded cable is shorted to the shield at the $x = L$ end of the line, and the open-circuit voltage, V_i , is measured at the $x = 0$ end. Under the assumptions that

- the internal and external transmission lines are electrically short ($L \ll \lambda$), and
- that there is negligible field excitation of the inner cable due to fields entering through the ends of the line,

the frequency-dependent transfer impedance of this cable shield can be approximated from equation (B.5a) as

$$Z'_t(\omega) = R'_t(\omega) + j X'_t(\omega) \approx \frac{V_i}{I_e L} \approx \frac{Z_s}{L} \frac{V_i}{V_s} \quad \Omega/\text{m} \quad (5)$$

where

Z'_t is the cable transfer impedance (in Ω/m);

ω is the angular frequency (in $2\pi \times \text{Hz}$);

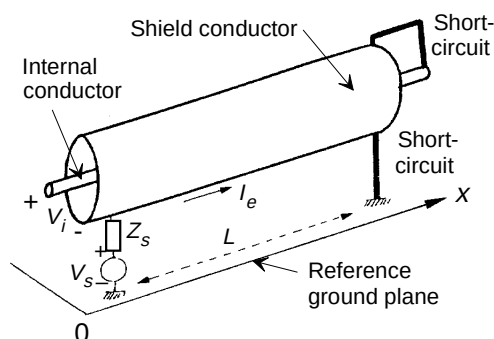
V_i is the internal open-circuit voltage on the internal conductor;

V_s is the excitation voltage of the external circuit of the cable shield (in V);

L is the length of the shield conductor (in m);

Z_s is the effective source impedance of the external voltage source (in Ω).

When using these expressions, it is very important to ensure that the line is electrically short. As the frequency increases, the current distribution on the exterior cable begins to have periodic nulls and peaks due to reflections from the shorted end of the line. Moreover, there are internal reflections from the short on the interior cable. These oscillations are the cause of significant errors in the measurement of transfer impedance at high frequencies.



IEC 1708/2000

Figure 8 – Basic configuration for transfer impedance measurement

La figure 9 illustre un comportement typique dans le domaine fréquentiel de l'impédance de transfert mesurée pour quatre différents câbles tressés présentant un blindage raisonnablement efficace. A basse fréquence, Z'_t est principalement résistive, avec une valeur égale à la résistance en c.c. par unité de longueur du blindage. A fréquence plus élevée, la pénétration de champ par les ouvertures de la tresse du blindage commence à affecter la réponse interne et le comportement du blindage est légèrement dégradé. Parallèlement, cette augmentation de l'impédance de transfert à haute fréquence est une variation de phase électrique – grandeur qu'il est primordial de connaître si l'on doit effectuer des calculs précis à l'aide du Z'_t mesuré.

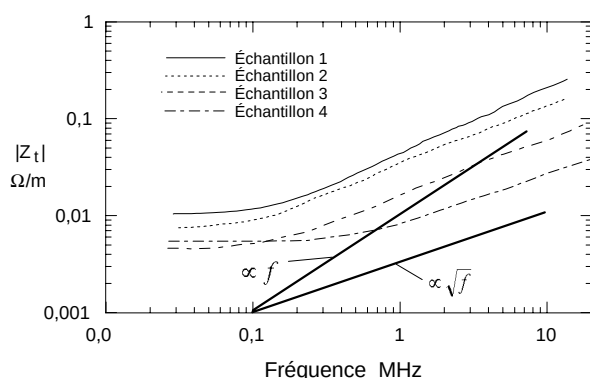


Figure 9a – Amplitude

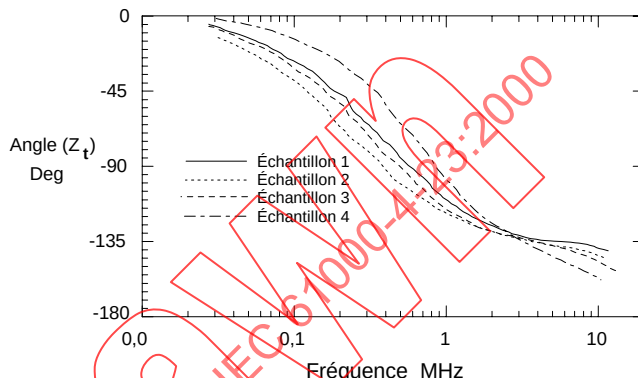


Figure 9b – Phase

NOTE A haute fréquence, les courbes sont proportionnelles à $\sqrt{f}$ plutôt que f , ce qui indique que les réponses ne sont pas bien représentées par une inductance simple.

Figure 9 – Amplitude de l'impédance de transfert mesurée et phase de l'impédance de transfert par unité de longueur pour quatre câbles de blindage tressés présentant des propriétés de blindage satisfaisantes

Détermination de l'admittance de transfert

Pour l'évaluation de l'admittance de transfert du blindage de câble, on utilise la configuration d'essai générale présentée à la figure 10. Elle est similaire à la configuration utilisée pour la mesure de l'impédance de transfert, mais les terminaisons sont différentes au niveau des extrémités de câble. En appliquant l'équation (B.5b), ainsi que des hypothèses identiques à celles utilisées pour l'impédance de transfert, l'admittance de transfert du blindage peut être exprimée par la formule suivante:

$$Y'_t \approx -\frac{1}{L} \frac{I_i}{V_s} \approx -j\omega C'_i C'_e S \quad \text{S/m} \quad (6)$$

où

Y'_t est l'admittance de transfert du câble (en S/m);

I_i est le courant dans le conducteur interne (en A);

V_s est la tension qui excite le circuit externe du blindage du câble (en V);

L est la longueur du câble (en m);

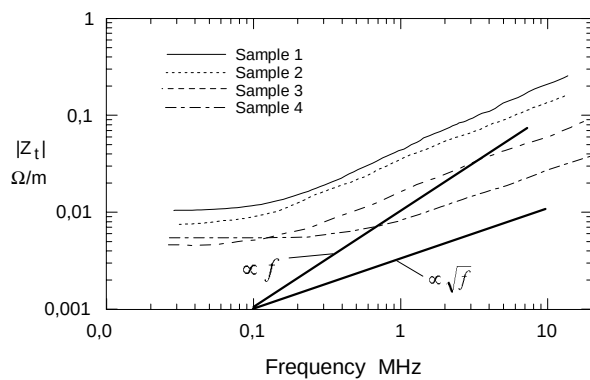
ω est la pulsation (en $2\pi \times \text{Hz}$);

S est le paramètre de fuites du blindage (en m/F);

C'_i est la capacité interne par unité de longueur du câble coaxial (en F/m);

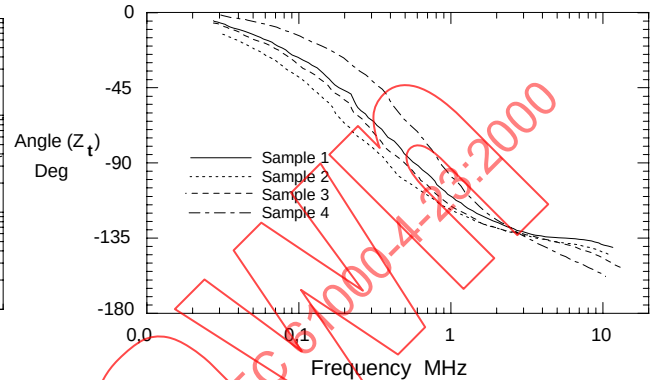
C'_e est la capacité externe par unité de longueur du câble coaxial (en F/m).

Figure 9 illustrates the typical frequency domain behaviour of the measured transfer impedance for four different braided cables having reasonably good shielding. At low frequencies, Z'_t is primarily resistive, with a value equal to the per-unit-length d.c. resistance of the shield. At higher frequencies, the field penetration through the apertures in the braid of the shield begins to affect the internal response and the shielding behaviour is slightly degraded. Accompanying this increase in transfer impedance at high frequencies is an electrical phase variation – a quantity that it is essential to know if any detailed calculations are to be performed using the measured Z'_t .



IEC 1709/2000

Figure 9a – Magnitude



IEC 1710/2000

Figure 9b – Phase

NOTE At high frequencies the curves are proportional to $\sqrt{f}$ rather than f which indicates that responses are not well represented by a simple inductance.

Figure 9 – Measured transfer impedance magnitude and phase of transfer impedance per unit length for four braided shield cables with good shielding properties

Determination of the transfer admittance

The evaluation of the transfer admittance of the cable shield utilizes the general test configuration shown in figure 10. This is similar to the configuration for the transfer impedance measurements, but with different terminations at the cable ends. Using equation (B.5b), together with the same assumptions as for the transfer impedance, the transfer admittance of the shield can be expressed as

$$Y'_t \approx -\frac{1}{L} \frac{I_i}{V_s} \approx -j\omega C'_i C'_e S \quad \text{S/m} \quad (6)$$

where

Y'_t is the cable transfer admittance (in S/m);

I_i is the internal conductor current (in A);

V_s is the excitation voltage of the external circuit of the cable shield (in V);

L is the length of the cable (in m);

ω is the angular frequency (in $2\pi \times \text{Hz}$);

S is the shield leakage parameter (in m/F);

C'_i is the internal per-unit-length capacitance of the coaxial cable (in F/m);

C'_e is the external per-unit-length capacitance of the coaxial cable (in F/m).

Ainsi, une mesure du courant dans le conducteur interne I_i résultant de la tension de source externe V_s fournit l'admittance de transfert. En estimant que Y'_t est purement réactive, on peut déterminer le paramètre de fuite du blindage S , si les capacités internes et externes par unité de longueur du câble coaxial C'_i et C'_e sont connues. Le paramètre S est un nombre simple, à valeur réelle, dépendant uniquement des caractéristiques du câble tressé. C'est donc un descripteur utile relatif aux blindages.

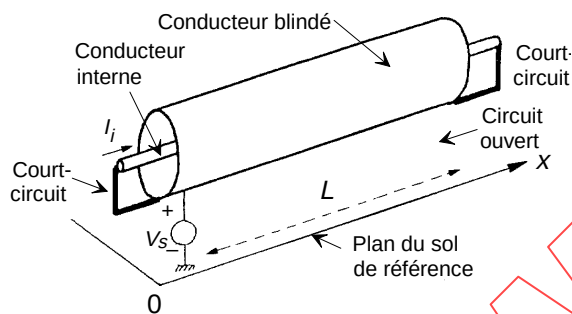


Figure 10 – Configuration de base pour la mesure de l'admittance de transfert

4.2.2 Essais de connecteurs de câble

Les connecteurs sur câbles blindés sont souvent plus importants, pour déterminer le blindage global du système de câbles, que le blindage de câble car le connecteur implique une interruption dans le blindage et, en tant que tel, présente une imperfection dans la topologie de blindage. On peut représenter les effets du connecteur (pour le circuit de transmission interne ou blindé) en utilisant des sources de tension et de courant à constantes localisées au niveau de l'emplacement du connecteur. L'intensité de ces sources est liée au courant et à la tension extérieurs sur le connecteur, multipliés par les grandeurs d'impédance de transfert et d'admittance localisées, comme dans le cas des pénétrations de blindage de câble réparties.

Comme pour un blindage tressé, l'impédance de transfert localisée d'un connecteur comporte une partie résistive et une partie réactive, et l'admittance de transfert d'un connecteur est principalement capacitive. Cependant, les connecteurs sont toujours conçus de façon que la pénétration du champ E dans le dispositif soit très réduite. Par conséquent, les effets de l'admittance de transfert du connecteur sont presque toujours largement plus faibles que les effets provenant de l'impédance de transfert. Généralement, le paramètre d'impédance de transfert localisé est le seul paramètre requis.

La configuration d'essai pour les connecteurs est similaire à celle applicable à l'impédance de transfert du blindage de câble étudiée précédemment. La figure 11 illustre la configuration d'essai générale relative à ces mesures. Des prescriptions identiques à celles de l'essai de blindage de câble sont appliquées ici, et la construction du blindage extérieur doit offrir un blindage plus efficace que le connecteur. On en déduit qu'un blindage solide est préférable à un blindage tressé pour cette mesure.

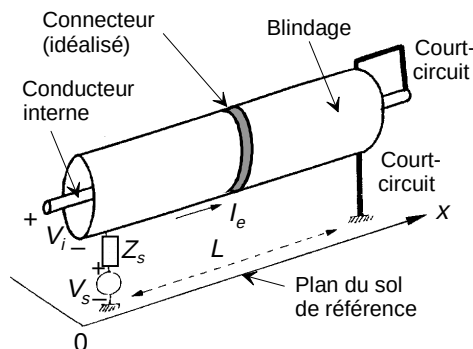


Figure 11 – Configuration d'essai pour la mesure de l'impédance de transfert d'un connecteur

Thus, a measurement of the internal conductor current arising from the external source voltage provides the transfer admittance. Under the approximation that the Y'_t is purely reactive, the shield leakage parameter can be determined, if the internal and external per-unit-length capacitances of the coaxial cable are known. The parameter S is a single, real-valued number, and depends only on the characteristics of the braided cable. Hence, it is a useful descriptor for cable shields.

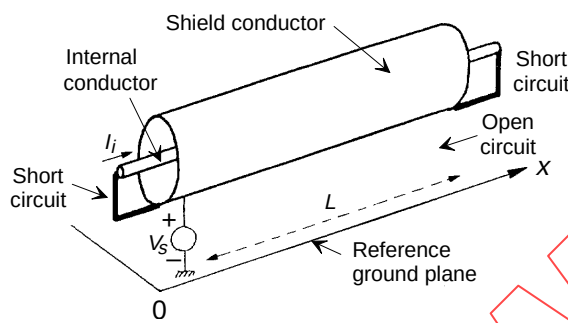


Figure 10 – Basic configuration for transfer admittance measurement

4.2.2 Testing of cable connectors

Connectors on shielded cables are often more important in determining the overall shielding of the cable system than is the cable shield. This is because the connector introduces an interruption to the shield, and, as such, presents an imperfection in the shielding topology. One way to represent the effects of the connector (as seen by the internal, or shielded, transmission line circuit) is by using discrete voltage and current sources at the location of the connector. The strengths of these sources are related to the external current and voltage on the connector multiplied by discrete transfer impedance and admittance parameters representing the connector, much as in the case of the distributed cable shield penetrations.

As in the case of a braided shield, the lumped transfer impedance of a connector contains both a resistive and reactive part, and the transfer admittance of a connector is primarily capacitive. However, cable connectors are always designed so that there is very small E -field penetration through the device. Consequently, the transfer admittance effects of the connector are almost always much lower than the effects from the transfer impedance. Usually, the lumped transfer impedance parameter is the only one required.

The test configuration for cable connectors is similar to that for the cable shield transfer impedance discussed previously. Figure 11 illustrates the general test configuration for such measurements. The same requirements for the test equipment for the cable shield test are required here, and the construction of the outer shield shall be such that it is a much better shield than the connector. This implies that a solid shield is preferable to a braid shield for this measurement.

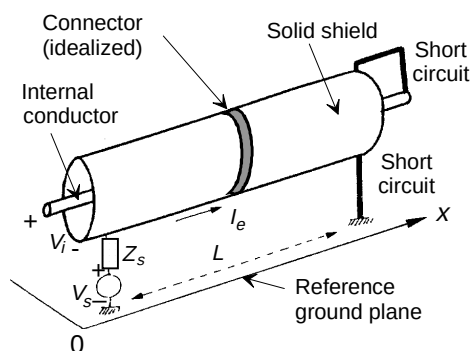


Figure 11 – Test configuration for transfer impedance measurement of a cable connector

Pour une mesure de la tension en circuit ouvert interne V_i , l'impédance de transfert du connecteur est déterminée par la formule

$$Z_t(\omega) = R_t(\omega) + j x_t(\omega) \approx \frac{V_i}{I_e} \approx Z_s \frac{V_i}{V_s} \quad \Omega \quad (7)$$

où

V_i et V_s ont été définis plus haut, et

Z_t est l'impédance de transfert du connecteur (en Ω);

Z_s est l'impédance du circuit externe (en Ω).

Il convient de noter que bien que la longueur du câble L n'apparaisse pas explicitement dans cette formule, il est nécessaire que $L \ll \lambda$. Il convient ainsi que L soit aussi court que possible afin d'optimiser la gamme de fréquences de validité pour les mesures.

4.3 Essais des matériaux de blindage

Il est souvent possible de protéger les imperfections dans la topologie de blindage d'un système en utilisant des méthodes localisées telles que des joints (sur des jonctions, entre des portes et leurs montants), des plaques conductrices ou des écrans (couvrant les ouvertures), ainsi que d'autres mesures spécifiques telles que des nids d'abeille et des guides d'onde au-dessus de la coupure. La caractérisation de ces mesures de protection est différente car leur comportement dépend non seulement de leur composition électrique individuelle, mais également de la manière dont les dispositifs sont reliés à la topologie de blindage. Par exemple, on peut protéger une craquelure très longue en la remplissant de matériau conducteur, ce qui peut être efficace pour assurer la protection contre des courants traversant la craquelure: le matériau conducteur laisse le courant traverser la craquelure sans provoquer de distorsion significative et minimise le champ H sur le côté blindé. Cependant, pour des courants parallèles à la craquelure, la présence ou l'absence de matériau de remplissage protecteur n'a pas d'importance. Le courant n'est pas affecté de façon significative par la fissure et il n'est pas nécessaire de fournir une protection contre cette composante de courant.

Pour décrire les essais adaptés à ces composants, nous essayerons donc de caractériser la propriété de blindage intrinsèque du dispositif de protection, indépendamment de son application dans une installation particulière. Cela signifie qu'un composant particulier peut être identifié comme un dispositif de protection «satisfaisant» dans une installation, mais que du fait de ses particularités d'utilisation dans une autre installation, il peut être considéré comme «insuffisant» dans ce cas. L'évaluation du comportement global d'un système ainsi que de l'ensemble de ses dispositifs de protection est réalisable par des essais effectués au niveau du système, ce qui dépasse le cadre de la présente norme.

4.3.1 Joints conducteurs

La figure 12 présente plusieurs configurations de joints conducteurs servant de dispositif de protection IEMN-HA. Le mécanisme de protection de base est le suivant: le joint forme un trajet conducteur entre les deux parties de l'enceinte, ce qui empêche les fuites de courant et de charge à l'intérieur (c'est-à-dire dans la région protégée). Chacune des trois configurations de la figure présente un comportement de blindage différent, du fait des différences de géométrie des parois de l'enceinte entourant le joint.

Given a measurement of the internal open-circuit voltage, the transfer impedance of the connector is determined by the expression

$$Z_t(\omega) = R_t(\omega) + j x_t(\omega) \approx \frac{V_i}{I_e} \approx Z_s \frac{V_i}{V_s} \quad \Omega \quad (7)$$

where

V_i and V_s have been defined previously, and

Z_t is the transfer impedance of the connector (in Ω);

Z_s is the impedance of the external circuit (in Ω).

It should be noted that while the length of the cable, L , does not appear explicitly in this expression, it is necessary that $L \ll \lambda$. Thus L should be as short as possible to maximize the frequency range of validity for the measurements.

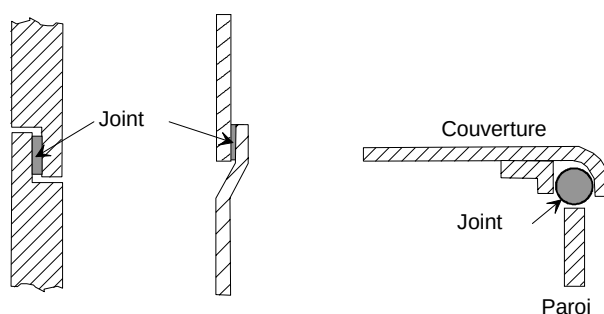
4.3 Testing of shielding materials

Imperfections in the shielding topology of a system can often be protected by using localized methods such as gaskets (on seam or between doors and their jambs), conducting sheets or screens (covering apertures), and other specialized measures like honeycombs and waveguides beyond cut-off. Characterizing these protection measures is different because their behaviour depends not only on their individual electrical composition, but also on how the devices are connected to the shielding topology. For example, a very long crack might be protected by filling it with a conducting material. This could be effective in protecting against currents flowing across the crack: the conducting material lets the current pass over the crack without much distortion and the H -field on the shielded side is minimized. However, for currents parallel to the crack, the presence or absence of the protective filling is unimportant. The current is not significantly affected by the slit, and any protection against this current component is unnecessary.

In describing tests suitable for these components, therefore, an attempt is made to characterize the intrinsic shielding property of the protection device, independently of how it is used in a particular installation. This means that a particular component might be classified as a "good" protective device in one installation, but due to the particularities of how it is used in another facility, considered to be a "poor" component in another installation. Evaluating the global behaviour of a system, together with all of its protection devices, is the role of system level testing, a subject which is beyond the scope of this standard.

4.3.1 Conducting gaskets

Figure 12 shows several configurations of a conducting gasket serving as a HEMP protection device. The basic mechanism for protection is that the gasket forms a conducting path between the two parts of the enclosure; this keeps current and charge from "leaking" into the inside (i.e. into the protected region). Each of the three configurations in the figure has a different shielding behaviour, due to the differences in the geometry of the enclosure walls that surround the gasket.

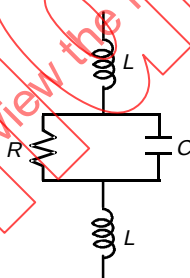


IEC 1713/2000

Figure 12 – Exemples d'utilisation de joints conducteurs en tant que dispositifs de protection IEMN-HA

Il est possible de réaliser un modèle de circuit simple mais général pour un joint d'étanchéité, en notant les parties importantes de la géométrie dans la figure 12. La circulation du courant d'un conducteur à un autre doit passer au travers du joint, qui présentera une résistance électrique au courant. De même, les plaques des deux côtés du joint apparaissent localement comme une capacité au travers de laquelle un courant de déplacement peut circuler. Finalement, les conducteurs métalliques des deux parois forment une inductance dans ce circuit.

La figure 13 montre la représentation de circuit équivalente pour ce type d'ouverture à joint. La résistance du joint et la capacité de l'ouverture du joint apparaissent en parallèle et cette combinaison est en série avec les inductances représentant les trajets du courant au travers des parois de l'enceinte. Les valeurs spécifiques pour L et C dépendent de la géométrie locale du joint, tandis que la valeur de R dépend à la fois de la géométrie et des propriétés électriques intrinsèques du matériau du joint.

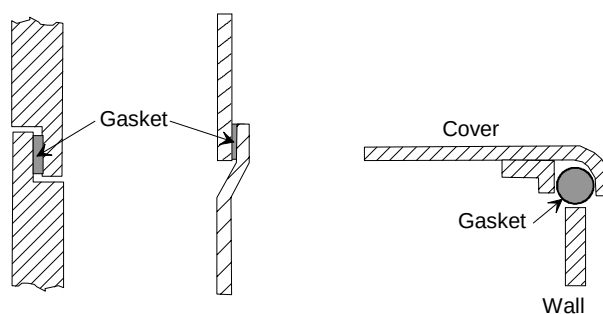


IEC 1714/2000

Figure 13 – Modèle de circuit représentant le comportement d'un joint conducteur de protection IEMN-HA

Ces valeurs de circuit peuvent être mesurées ou calculées en utilisant des modèles simples pour la forme et la géométrie spécifiques à l'étude d'un problème donné. Pour caractériser les propriétés électriques du matériau du joint, on peut cependant mesurer la *résistivité électrique* du matériau du joint. Cette grandeur est indépendante de l'environnement du joint et peut être utilisée pour situer l'efficacité d'un type de joint par rapport à un autre. Il est à noter, toutefois, que ces joints sont généralement réalisés en un matériau souple et que leurs caractéristiques dépendent donc de la pression de contact comme dans tous les exemples de la figure 12. L'âge des matériaux du joint constitue également un facteur.

La figure 14 illustre la configuration de mesure relative à la résistivité. Il s'agit de la méthode à quatre électrodes, spécialement conçue pour réaliser des mesures de matériaux à très faible résistivité. Pour cette mesure, un bloc de matériau de joint est placé en sandwich entre deux électrodes en cuivre ou fabriquées dans un autre matériau fortement conducteur. Une source de tension continue extérieure est reliée aux bornes des deux électrodes extérieures et l'on fait passer un courant au travers de l'électrode. La chute de tension qui en résulte, au niveau de l'échantillon, est mesurée à l'aide d'un voltmètre à impédance d'entrée élevée de façon à ne pas perturber la circulation de courant dans l'échantillon. Une fois ces paramètres mesurés, la résistivité moyenne en c.c. du matériau de l'échantillon est donnée par la formule:

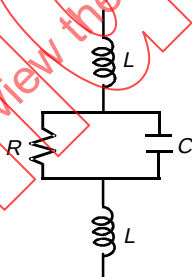


IEC 1713/2000

Figure 12 – Examples of conducting gaskets used as HEMP protection devices

A simple yet general circuit model for a gasket seal can be made by noting the important parts of the geometry in figure 12. Current flowing from one conductor to another has to pass through the gasket and this will present an electrical resistance to the current. Similarly, the flat plates on either side of the gasket appear locally as a capacitance through which a displacement current can flow. Finally, the metal conductors of the two walls form an inductance in this circuit.

Figure 13 shows the equivalent circuit representation of such a gasketed opening. The resistance of the gasket and the capacitance of the gasket opening appear in parallel, and this combination is in series with the inductances representing the current paths through the walls of the enclosure. Specific values for L and C depend on the local geometry of the seal, whereas the value of R depends on both the geometry and on the intrinsic electrical properties of the gasket material.



IEC 1714/2000

Figure 13 – Circuit model representing the behaviour of a conducting gasket for HEMP protection

These circuit values can be measured or calculated using simple models for the specific shape and geometry under consideration for a given problem. For characterizing the electrical properties of the gasket material, however, measurements of electrical resistivity of the gasket material can be used. This quantity is independent of the surroundings of the gasket and can be used to rank the effectiveness of one type of gasket with another. It should be noted, however, that such gaskets are usually made of flexible material, and, therefore, their characteristics are dependent on contact pressure as in all examples of figure 12. The age of gasket materials is also a factor.

Figure 14 illustrates the measurement configuration for the resistivity. This is the four-electrode method, and it is specially designed so that measurements of materials with very low resistivities can be made. For this measurement, a block of the gasket material is sandwiched between two electrodes made from copper or another highly conducting material. An external d.c. voltage source is connected across the two outer electrodes and a current is allowed to pass through the electrode. The resulting voltage drop across the sample is measured using a high input impedance voltmeter, so as not to disturb the current flow in the sample. With these parameters measured, the d.c. resistivity of the sample material is given by the expression:

$$\rho_{DC} = \frac{V_s}{I_0} \frac{A}{L} \quad \Omega \cdot m \quad (8)$$

où

ρ_{DC} est la résistivité moyenne en c.c. du matériau de l'échantillon (en $\Omega \cdot m$);

A est la section de l'échantillon du matériau du joint (en m^2);

L est l'épaisseur de l'échantillon (en m);

I_0 est le courant qui passe à travers l'échantillon (en A);

V_s est la chute de tension sur l'échantillon (en V).

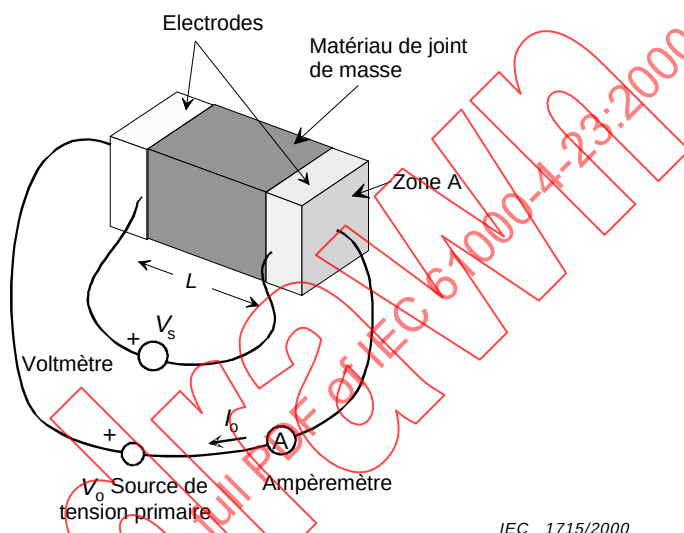


Figure 14 – Configuration de mesure de la résistivité d'un échantillon

Des mesures similaires peuvent être réalisées à fréquence plus élevée et une impédance de joint dépendant de la fréquence peut être mesurée. Cependant, cette grandeur est d'application limitée, car ses variations de fréquence peuvent facilement être confondues avec celles du matériel de montage du joint et de son environnement. Par conséquent, la résistivité en c.c. représente le paramètre le plus fréquemment utilisé pour caractériser le matériau du joint.

4.3.2 Plaques et écrans conducteurs

Des plaques ou écrans conducteurs réalisés en matériau conducteur sont souvent utilisés pour limiter la pénétration IEMN-HA à travers des ouvertures du blindage. Parmi ces dispositifs de protection, on distingue les éléments suivants:

- treillis en toile métallique;
- revêtements de peinture conducteurs;
- revêtements métallisés sous vide;
- pistolets à flamme/arc électrique;
- feuilles métalliques bordant des cases d'équipement;
- matériaux de remplissage métalliques ajoutés aux enceintes en plastique.

Comme dans le cas d'un matériau de joint, il est possible de caractériser ces dispositifs de protection soit en mesurant leur comportement de blindage dans une configuration topologique spécifique, soit en mesurant certaines propriétés électriques intrinsèques du matériau de blindage. Cette dernière mesure peut ne pas donner d'indication précise sur le fonctionnement du dispositif de protection dans une installation arbitraire, mais elle fournit en revanche une technique utile pour faire la distinction entre un matériau de protection et un autre de manière cohérente. Deux concepts d'essai relatifs aux dispositifs de protection d'ouverture conducteurs sont étudiés en 4.3.2.1 et 4.3.2.2: l'un mesure la résistivité du matériau conducteur, l'autre mesure l'efficacité de blindage du matériau utilisé pour le blindage dans des conditions contrôlées.

$$\rho_{DC} = \frac{V_s}{I_o} \frac{A}{L} \quad \Omega \cdot m \quad (8)$$

where

ρ_{DC} is the d.c. resistivity of the sample material in ($\Omega \cdot m$);

A is the cross-sectional area of the gasket material (in m^2);

L is the thickness of the gasket sample (in m);

I_o is the current passing through the sample (in A);

V_s is the voltage drop across the sample (in V).

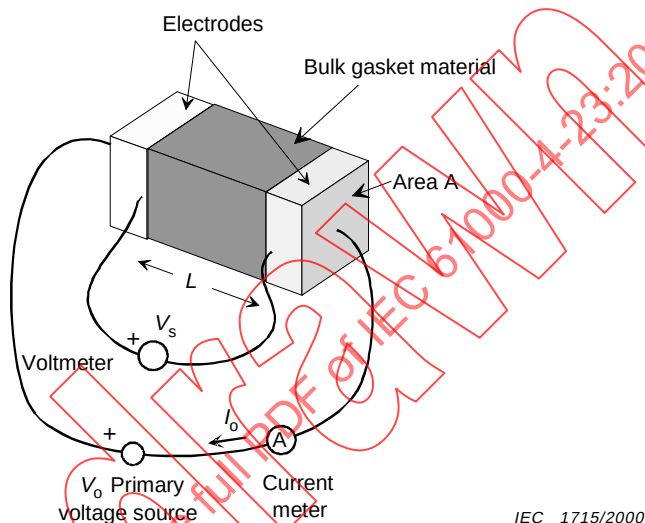


Figure 14 – Measurement configuration for the resistivity of a sample

Similar measurements can be made at higher frequencies and a frequency-dependent gasket impedance can be measured. However, this quantity is of limited use, because its frequency variations are easily confused with those of the gasket-mounting hardware and surroundings. Consequently, the d.c. resistivity is the most commonly used parameter for characterizing the gasket material.

4.3.2 Conducting sheets and screens

Conducting screens or sheets of conducting material are often used to limit the HEMP penetration through apertures in the shield. Such protection devices include

- wire mesh screens;
- conductive paint coatings;
- vacuum metallized coatings;
- flame/arc sprays;
- metallic foils lining equipment bays;
- metallic fillings added to plastic enclosures.

As in the case of gasketing material, it is possible to characterize these protection devices either by measurements of their shielding behaviour as installed in a specific topological configuration, or by an alternate measurement of some intrinsic electrical property of the shielding material. While this latter measurement may not accurately indicate how the protection device will function in an arbitrary installation, it does provide a useful technique for distinguishing between one protection material and another in a self-consistent manner. Two test concepts for conducting aperture protective devices are discussed in 4.3.2.1 and 4.3.2.2: one which measures the resistivity of the conducting material, and another which measures the shielding effectiveness of the material used for shielding under controlled conditions.

4.3.2.1 Mesure de la résistivité du matériau

La résistivité du matériau englobant l'élément de protection d'une ouverture est un paramètre qui peut être utilisé pour caractériser son blindage. Comme dans le cas du joint conducteur décrit en 4.3.1, la résistivité d'une plaque conductrice peut être déterminée en utilisant la configuration d'essai présentée à la figure 14. Une autre approche consiste à utiliser une technique de mesure dans laquelle la résistivité en c.c. est évaluée au moyen de sondes situées à la surface de l'échantillon, comme indiqué à la figure 15.

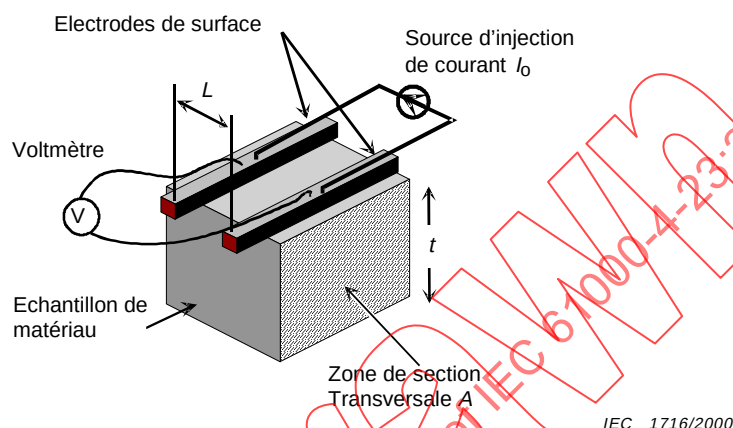


Figure 15 – Concept d'essai pour la mesure de la résistivité au moyen de sondes de surface

Dans cet essai, une source de courant continu constante I_0 est connectée à deux électrodes séparées d'une distance L et présentant un bon contact électrique avec un bloc de matériau conducteur. En réponse à ce courant, une tension V_s est induite aux bornes des deux électrodes. Cette tension peut être mesurée par un voltmètre d'impédance élevée et la résistivité est donnée à nouveau par l'équation (8). La même formule est utilisée dans le cas présent car l'on suppose que le bloc est un bon conducteur et que le courant tend à circuler uniformément au travers de la section A du matériau d'une électrode à l'autre.

Il est important de noter que cette procédure de mesure est applicable uniquement à basse fréquence, quand l'épaisseur de peau du matériau en question est très grande en comparaison de l'épaisseur de l'échantillon. Si la fréquence de la source de courant augmente, l'épaisseur de peau (donnée par $\delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu)}$) diminue et, en un certain point, elle commence à être comparable à l'épaisseur du matériau en essai. En ce point, il faut prendre en compte les particularités de la répartition du courant dans la section du conducteur, comme indiqué à l'annexe E.

Selon l'annexe E, il est possible de calculer l'impédance linéique (associant le champ E tangentiel à l'extérieur de la barrière protectrice au courant d'excitation en surface) et l'impédance de transfert (associant le champ E tangentiel à l'intérieur de la barrière protectrice au courant d'excitation en surface (voir équation E.14 et équation E.17) une fois que l'on connaît la résistivité du matériau. Ainsi, la mesure en c.c. de la résistivité peut être utilisée pour déterminer les propriétés de blindage du matériau pour des fréquences plus élevées.

4.3.2.2 Mesures de l'efficacité du blindage

Une approche plus directe pour caractériser le comportement de blindage d'un treillis ou d'un écran conducteur consiste à mesurer son efficacité de blindage dans des conditions normalisées. Il est bien connu que dans le champ proche (ou pour de basses fréquences), les champs électriques et magnétiques pénètrent dans un conducteur de façon différente. Par conséquent, un blindage doit être caractérisé en général par deux paramètres d'efficacité de blindage différents. Pour un blindage en champ lointain, où le champ incident sur le blindage est une onde plane, les deux valeurs d'efficacité de blindage s'égalisent, et cette valeur unique peut être utilisée pour caractériser la protection.

4.3.2.1 Measurement of material resistivity

The resistivity of the material comprising the protective cover of an aperture is one parameter that may be used to characterize its shielding. As in the case of the conducting gasket described in 4.3.1, the resistivity of a conducting sheet can be determined using the test configuration shown in figure 14. An alternative approach is to use a measurement technique in which the d.c. resistivity is measured with probes located on the surface of the sample as indicated in figure 15.

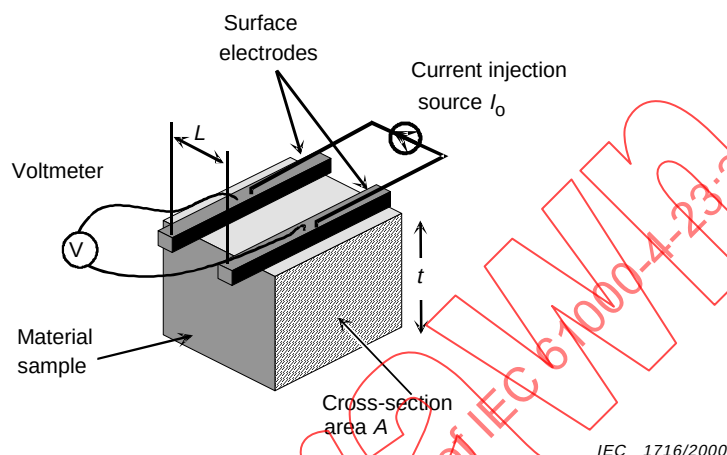


Figure 15 – Test concept for measuring the resistivity with surface probes

In this test, a constant d.c. current source I_0 is connected to two electrodes separated by a distance L and in good electrical contact with a block of conducting material. In response to this current, a voltage V_s is induced across the two electrodes. This voltage may be measured by a high impedance voltmeter and the resistivity is again given by the expression in equation (8). The same expression is used in the present case, because it is assumed that the block is a good conductor and the current tends to flow uniformly across the cross-sectional area A of the material from one electrode to the other.

It is important to note that this measurement procedure is applicable only at low frequencies where the skin depth of the material in question is very large compared to the thickness of the sample. If the frequency of the current source were allowed to increase, the skin depth (given by $\delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu)}$) decreases and, at some point, begins to be comparable with the thickness of the material under test. At this point, the details of the current distribution in the conductor cross-section must be taken into account, as discussed in annex E.

As noted in annex E, both the surface impedance (relating the tangential E -field outside the protective barrier to the excitation surface current) and the transfer impedance (relating the tangential E -field inside the protective barrier to the excitation surface current) may be calculated (see equations E.14 and E.17), once the material resistivity is known. Thus, the d.c. measurement of the resistivity can be used to infer the shielding properties of the material for higher frequencies.

4.3.2.2 Shielding effectiveness measurements

A more direct approach for characterizing the shielding behaviour of a wire mesh or conducting screen is to measure its shielding effectiveness under standard conditions. It is well known that in the near field (or equivalently, for low frequencies), the electric and magnetic fields penetrate into a conductor differently. Consequently, a shield shall be characterized in general by two different shielding effectiveness parameters. For far-field shielding, where the incident field on the shield is a plane wave, the two shielding effectiveness values become equal, and this single value may be used to characterize the protection.

La figure 16 illustre le concept de mesure de l'efficacité de blindage d'onde plane d'écrans et de plaques. La figure 16a présente la situation idéale, dans laquelle une onde plane est incidente par rapport à un écran infini. Le blindage de cet écran peut être caractérisé par l'équation suivante (voir équation (2)):

$$SE_A = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

où

A_{out} représente la principale composante du champ incident E^{inc} (ou H^{inc}) au niveau d'un point d'observation en supprimant l'écran conducteur;

A_{in} représente la même composante pour le champ transmis au travers de l'écran: E^t (ou H^t).

L'efficacité de blindage qui en résulte dépend de l'angle ψ constitué par le champ incident perpendiculaire à la plaque. Normalement, on choisit l'angle $\psi = 0^\circ$ pour définir les propriétés de blindage du plan infini.

Dans le cadre de mesures réelles, la configuration idéale de la figure 16a ne peut pas être appliquée, du fait que la source produisant le champ incident n'est pas de taille infinie et n'est pas située à une distance infinie par rapport à l'écran. De plus, l'écran n'est pas infiniment large. Cela implique que les mesures réalisées en utilisant la configuration de la figure 16b peuvent être différentes de celles obtenues à partir d'un traitement théorique d'une géométrie de plan infini, en raison des effets suivants:

- nature d'onde non plane des champs incidents provenant de la source;
- diagramme de rayonnement de la source;
- diffraction des bords de l'écran.

Pour minimiser cette difficulté, on impose souvent le maintien des conditions suivantes dans la configuration de mesure:

- taille d'écran $a \gg \lambda$;
- points d'observation et de source d_o et $d_s < a$;
- $\psi = 0^\circ$ (incidence normale).

A partir de ces hypothèses, on obtient une approximation de l'efficacité de blindage à onde plane de l'écran en réalisant deux mesures des composantes de champ primaire sélectionnées au niveau du point d'observation. La première mesure est effectuée sans la plaque et est désignée par $E_{removed}^m$ (ou $H_{removed}^m$). La deuxième mesure représente la même composante de champ mais en présence de la plaque en face du radiateur; elle est désignée par $E_{covered}^m$ (ou $H_{covered}^m$). L'efficacité de blindage, pour cette configuration, est ensuite évaluée par la formule:

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{|E_{removed}^m|}{|E_{covered}^m|} \right) \text{ dB} \quad (10)$$

Figure 16 illustrates the measurement concept for the plane-wave shielding effectiveness of screens and sheets. Figure 16a shows the ideal situation, in which a plane wave is incident upon an infinite screen. The shielding of this screen can be characterized by the following equation (see equation (2)):

$$SE_A = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{out}|}{|A_{in}|} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

where

A_{out} represents the principal component of the incident field E^{inc} (or H^{inc}) at an observation point with the conducting screen removed;

A_{in} is the same component of the field that is transmitted through the screen: E^{tr} (or H^{tr}).

The resulting shielding effectiveness depends on the angle ψ that the incident field makes with the normal to the sheet. Normally, the angle $\psi = 0^\circ$ is chosen for defining the shielding properties of the infinite plane.

For actual measurements, the idealized configuration of figure 16a cannot be realized, due to the fact that the source producing the incident field is not of infinite size, nor is it infinitely far from the screen. Moreover, the screen is not infinitely large. This implies that the measurements made using the test configuration in figure 16b can be different from those expected from a theoretical treatment of the infinite plane geometry, due to the following effects:

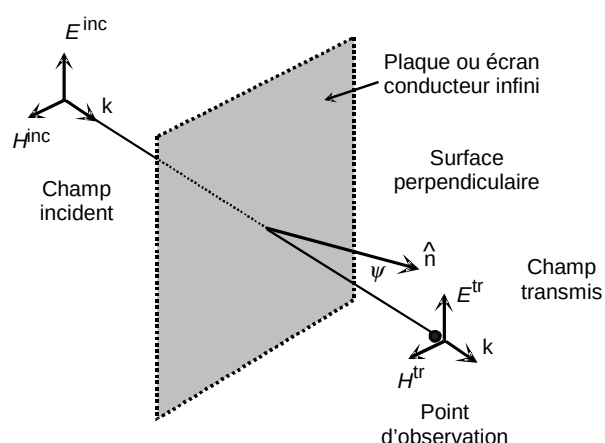
- the non-plane-wave nature of the incident fields from the source;
- the radiation pattern from the source;
- diffraction from the edges of the screen.

To minimize this difficulty, it is common to require the following conditions to be maintained in the measurement configuration:

- the size of the screen $a \gg \lambda$;
- the observation and source positions d_o and $d_s < a$;
- $\psi = 0^\circ$ (normal incidence).

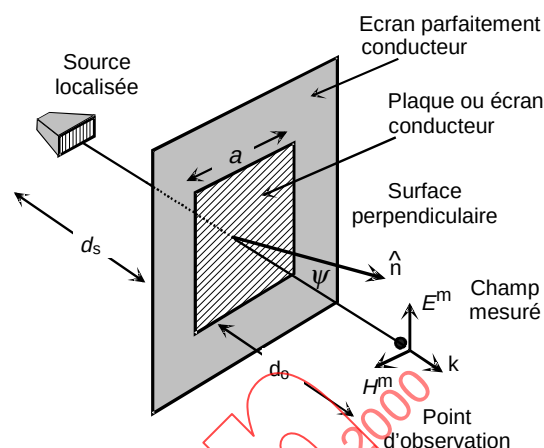
With these assumptions, an approximation to the plane-wave shielding effectiveness of the screen is obtained by making two measurements of the selected primary field components at the observation location. The first measurement is with the plate removed and is denoted as $E_{removed}^m$ (or $H_{removed}^m$). The second measurement is the same field component with the plate in place in front of the radiator, and is denoted as $E_{covered}^m$ (or $H_{covered}^m$). The shielding effectiveness for this configuration is then evaluated as

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{|E_{removed}^m|}{|E_{covered}^m|} \right) \text{ dB} \quad (10)$$



IEC 1717/2000

Figure 16a – Idéalisation

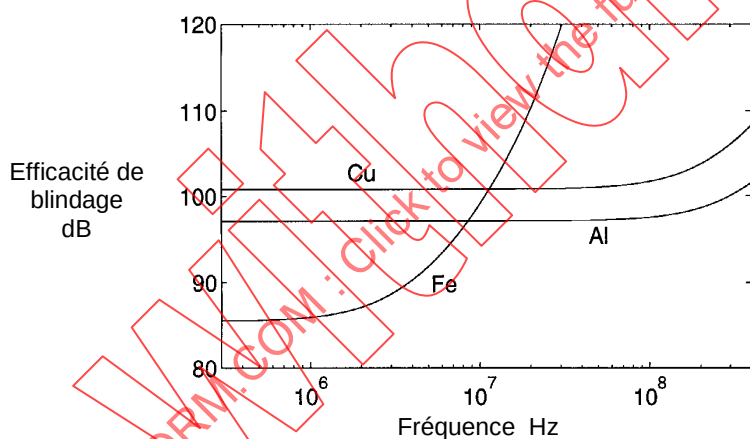


IEC 1718/2000

Figure 16b – Réalisation expérimentale

Figure 16 – Concepts relatifs à la mesure de l'efficacité de blindage des plaques conductrices et des écrans

A titre d'exemple illustrant l'efficacité de blindage d'onde plane d'une plaque en matériau différent, la figure 17 présente des données calculées pour des plaques de cuivre, d'aluminium et de fer, chacune possédant une épaisseur de 0,01 mm. Des résultats similaires sont prévisibles pour des matériaux présentant d'autres valeurs de conductivité.



IEC 1719/2000

Paramètres de matériau:

Cu: $\sigma = 58 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$

Al: $\sigma = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$

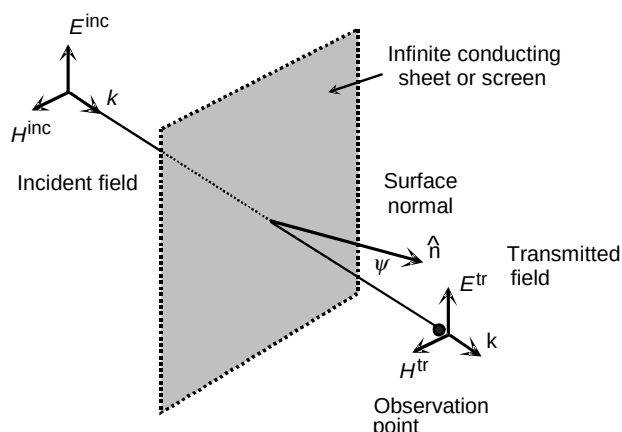
Fe: $\sigma = 10 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 400$

Figure 17 – Exemple d'efficacité de blindage en onde plane calculée pour une plaque de 0,01 mm d'épaisseur en matériau différent, en fonction de la fréquence

4.3.3 Guides d'onde de coupure et nids d'abeille

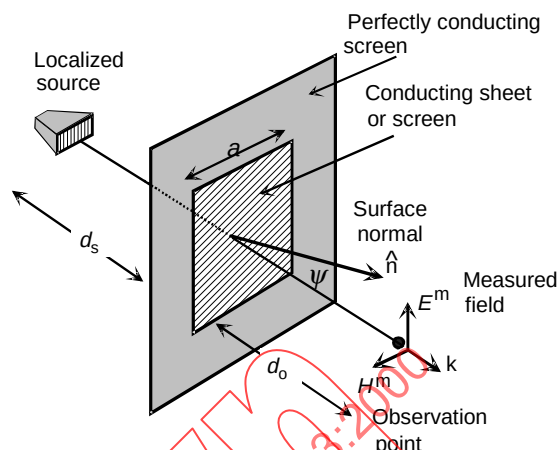
Un autre type de mesure de protection IEMN-HA consiste à utiliser un ou plusieurs guides d'onde de coupure ou structures en nid d'abeille dans une paroi conductrice, comme l'illustre la figure 18. Cette méthode permet une circulation facile de l'air ou d'un autre matériau non conducteur entre l'intérieur et l'extérieur d'une enceinte, tout en fournissant une forte atténuation de l'environnement de champ EM. Le concept d'essai relatif à cette méthode de protection de pénétration est identique à celui utilisé pour le treillis conducteur ou l'écran de la figure 16.

Comme auparavant, les guides d'onde ou les nids d'abeille doivent être situés dans une paroi fortement conductrice, et les mesures d'efficacité de blindage doivent être réalisées avec ou sans paroi, comme dans la description de 4.3.2.



IEC 1717/2000

Figure 16a – Idealization

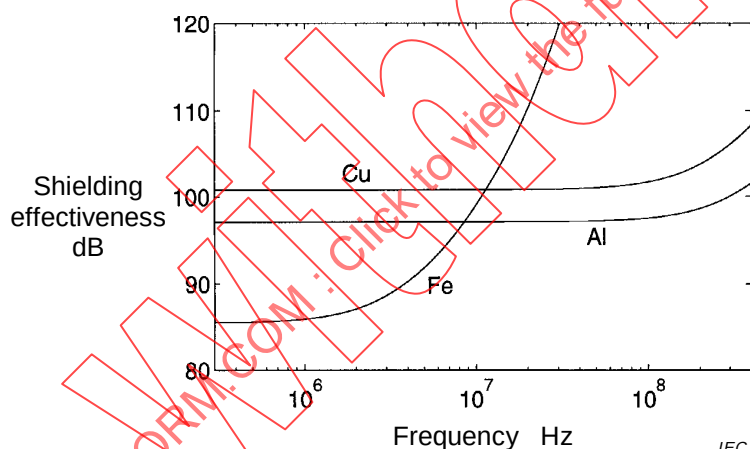


IEC 1718/2000

Figure 16b – Experimental realization

Figure 16 – Concepts for shielding effectiveness measurement of conducting sheets and screens

As an example of the plane-wave shielding effectiveness of a plate of different material, figure 17 presents calculated data for copper, aluminium and iron sheets, each having a thickness of 0,01 mm. Similar results are expected for materials having other conductivities.



IEC 1719/2000

Material parameters:

Cu: $\sigma = 58 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$

Al: $\sigma = 38 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$

Fe: $\sigma = 10 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\mu_r = 400$

Figure 17 – Example of the calculated plane-wave shielding effectiveness of a 0,01 mm thick plate of different material as a function of frequency

4.3.3 Cut-off waveguides and honeycombs

Another type of HEMP protection measure is to use one or more cut-off waveguides or honeycomb structures in a conducting wall, as illustrated in figure 18. This permits the easy flow of air or other non-conducting material in and out of an enclosure, while at the same time providing large attenuation to the EM field environment. The test concept for this penetration protection method is identical to that for the conducting mesh or screen shown in figure 16.

As before, the waveguides or honeycomb protection shall be located in a highly conducting wall, and shielding effectiveness measurements shall be made with and without the wall present, as described in 4.3.2.

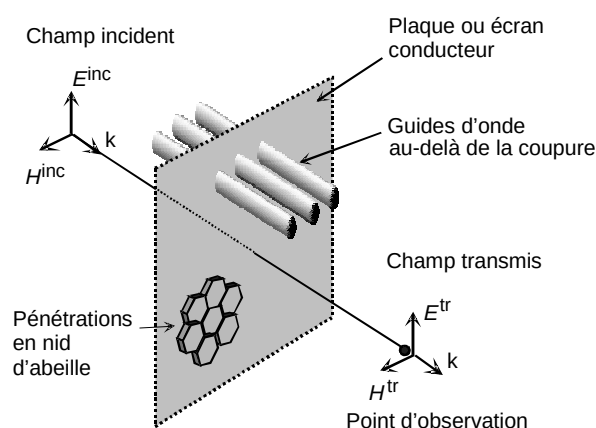


Figure 18 – Guides d'onde de coupure et nid d'abeille utilisés comme éléments de protection

4.4 Résumé des concepts d'essai

Un certain nombre de concepts d'essai différents ont été présentés dans ce paragraphe, traitant différents aspects des systèmes blindés. Le tableau 1 résume les concepts d'essai recommandés pour les différentes composantes du système. Pour sélectionner les différents essais, il est important de réaliser qu'il n'existe pas d'essai « idéal » pour un système. Chaque essai a ses points forts et ses points faibles. Chaque essai présente des incertitudes et des erreurs de résultat, par exemple du fait de l'interaction entre l'objet d'essai et le matériel de mesure, de la variabilité de l'objet d'essai, de l'uniformité des champs, des effets non linéaires et des erreurs de mesure. Pour sélectionner un essai, il convient donc que l'utilisateur considère attentivement les prescriptions suivantes pour l'essai proposé:

- pourquoi réalise-t-on l'essai ?
- l'essai est-il réellement nécessaire ?
- quel résultat attend-on de l'essai ?
- quel est la précision requise au niveau des résultats d'essai ?

Les réponses à ces questions serviront à placer les procédures d'essai dans une meilleure perspective; elles permettront à l'utilisateur de sélectionner l'essai adéquat et de minimiser le coût des essais.

Tableau 1- Procédure d'essai recommandée pour différents objets d'essai

Objet d'essai	Procédure d'essai						
	Illumination transitoire à pleine échelle	Illumination non modulée à pleine échelle	Simulation de cellule TEM	Excitation d'impulsion de simulateur réduite	Excitation locale des plaques collectrices	Essai d'injection de courant	Dispositifs d'essai spécifiques
Bâtiments	1	2	–		3	–	–
Salles blindées	1	2	–		3	3	–
Enceintes	–	–	1	1	2	3	–
Ouvertures	–	–	–	–	1	2	3
Joints et raccords	–	–	–	–	2	1	3
Caractérisation de câbles et conduits	–	–	3	3	–	2	1

NOTE 1 Concept(s) d'essai recommandé(s).
 NOTE 2 Concept d'essai de secours.
 NOTE 3 Essai de dernier recours.

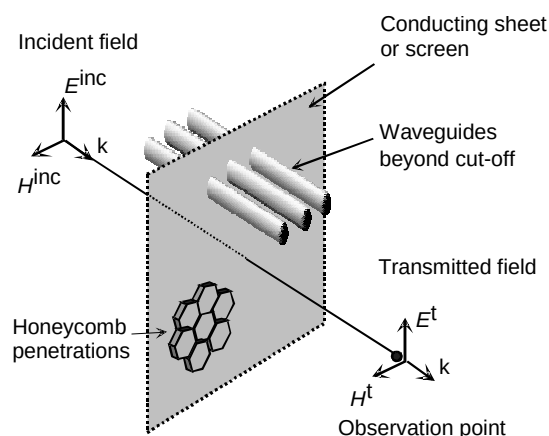


Figure 18 – Cut-off waveguides and honeycomb used as protective elements

4.4 Test concept summary

A number of different test concepts have been presented in this subclause for different aspects of shielded systems. Table 1 summarizes the recommended test concepts for the different system components. In selecting the various tests, it is important to realize that there is never a "best" test for a system. Each test has its strong points and its flaws. Each test has uncertainties and errors in the result, e.g. test object and measurement equipment interaction, test object variability, uniformity of fields, non-linear effects and measurement errors. In selecting a test, therefore, the user should carefully consider the following requirements for the proposed test:

- why is the test being conducted?
- is the test really necessary?
- what is the expected result from the test?
- what is the required accuracy of the test results?

Answers to these questions will serve to put the various test procedures into better perspective and will allow the user to select the proper test and minimize the cost of the testing.

Table 1 – Recommended test procedure for different test objects

Test object	Test procedure						
	Full-scale transient illumination	Full-scale CW illumination	TEM cell simulation	Small simulator pulse excitation	Local excitation of PoEs	Current injection testing	Specialized test fixtures
Buildings	1	2	–		3	–	–
Shielded rooms	1	2	–		3	3	–
Equipment enclosures	–	–	1	1	2	3	–
Apertures	–	–	–	–	1	2	3
Gaskets and seams	–	–	–	–	2	1	3
Cable and conduit characterization	–	–	3	3	–	2	1

NOTE 1 Recommended test concept(s).

NOTE 2 Back-up test concept.

NOTE 3 Test of last resort.

5 Procédures d'essai IEMN-HA

Du fait de la diversité des méthodes de simulation des effets IEMN-HA sur un système, une grande variété d'installations de configurations de matériel et de procédures peut être utilisée pour réaliser les essais sur les dispositifs de protection. Cet article synthétise les procédures d'essai pour chacun des concepts d'essai présentés à l'article 4.

5.1 Essais de champ électromagnétique

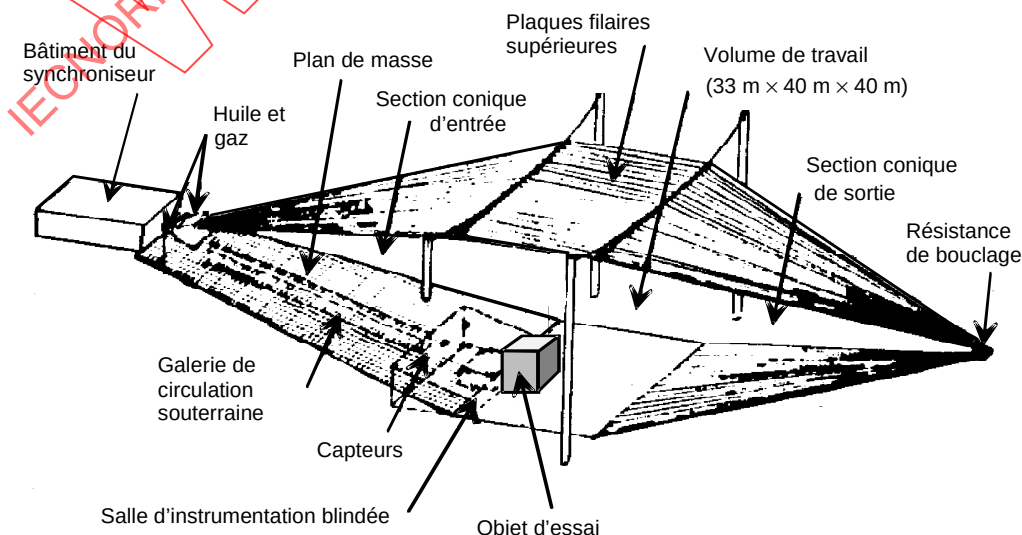
Comme indiqué dans le diagramme séquentiel d'interaction de l'annexe A, les essais peuvent être réalisés en générant les champs d'excitation E et H au niveau d'une interface d'essai dans un système, ou en simulant les effets de l'interaction de ces champs avec les barrières du système en injectant un courant et une charge appropriés en surface. Le paragraphe 5.1 s'intéresse aux méthodes de simulation de l'excitation de champ au niveau du système en essai.

5.1.1 Essais de champ d'impulsion

5.1.1.1 Illumination du système à pleine échelle

Les essais d'impulsion à pleine échelle sont particulièrement adaptés à une évaluation fiable au niveau du système. Pouvant fournir une quantité d'informations largement plus importante concernant la réponse du système face à l'IEMN-HA, ils sont rarement utilisés pour évaluer uniquement le comportement de blindage d'un simple élément de protection du système, tel que la barrière de blindage extérieure.

Les champs IEMN-HA incidents sont généralement produits par un générateur MARX de décharge capacitif qui stocke l'énergie sur une période de temps étendue (de l'ordre de quelques minutes) dans des batteries de condensateurs, puis qui décharge l'énergie pendant une durée très courte (en nanosecondes) dans une structure rayonnante physiquement importante (dimensions types de l'ordre de 50 m à 100 m). La structure rayonnante peut se comporter comme un guide d'onde pour conduire les champs vers l'objet d'essai, ou comme une antenne rayonnant librement dans l'espace. Dans les deux cas, l'objet d'essai est illuminé par un champ IEMN-HA transitoire et réagit de manière appropriée. Généralement, il convient que la hauteur de l'objet d'essai ne soit pas supérieure à $1/3$ à $1/2$ de la séparation entre les deux plaques du volume de travail du simulateur, de façon à minimiser l'interaction des plaques et à permettre une meilleure approximation des conditions en espace libre. La figure 19 illustre plusieurs types de simulateurs à pleine échelle.



IEC 1721/2000

Figure 19a – Simulateur à polarisation verticale à champ confiné

5 HEMP test procedures

Because of the diverse ways to simulate the effects of HEMP on a system, there is a wide variety of facilities, equipment configurations, and procedures that can be used to perform tests on protection devices. This clause summarizes test procedures for each of the test concepts presented in clause 4.

5.1 Electromagnetic field testing

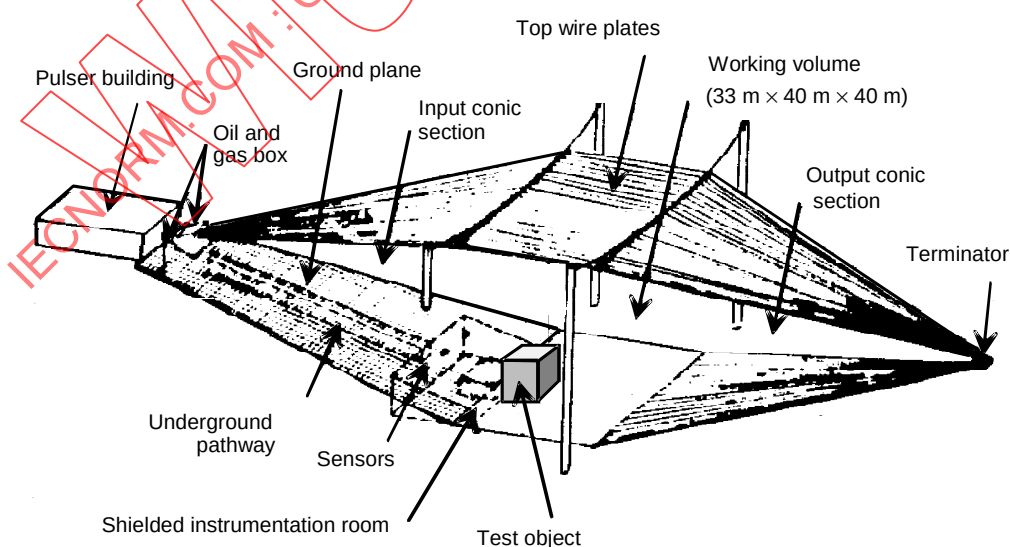
As noted in the interaction sequence diagram in annex A, testing can be done either by generating the excitation E and H fields at a testing interface within the system, or by simulating the effects of these fields interacting with the system barriers by injecting appropriate current and charge on the surfaces. This subclause discusses simulation methods for the field excitation of the system under test.

5.1.1 Pulse field testing

5.1.1.1 Full-scale system illumination

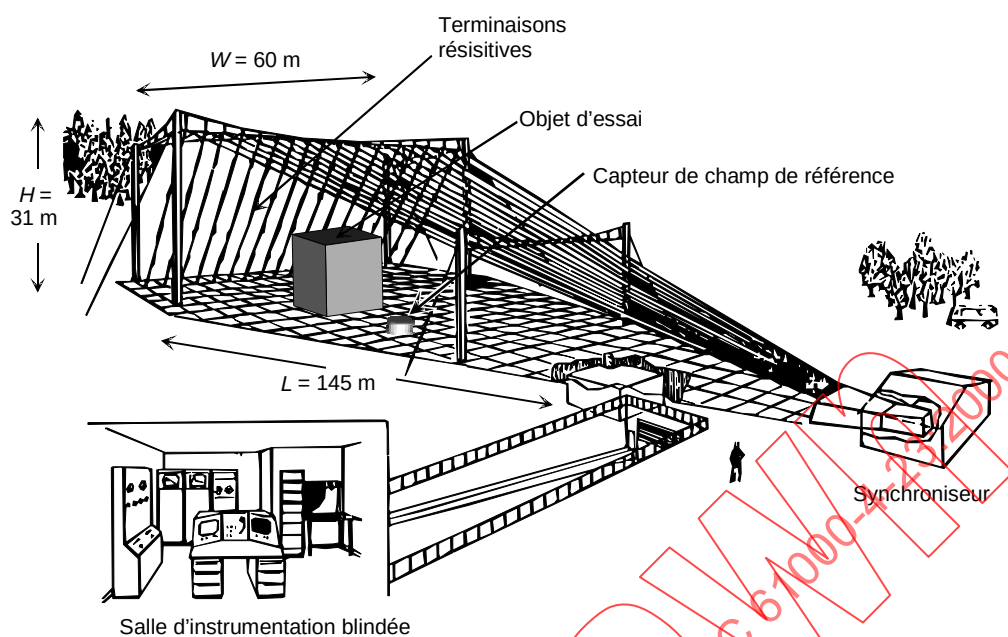
Full-scale pulse testing is most suitable for performing a high-confidence, system-level assessment. Because it is capable of providing much more information about the system response to HEMP, it is seldom used to evaluate only the shielding behaviour of a single protective element of the system, such as the outer shielding barrier.

The incident HEMP fields are typically produced by a capacitive discharge MARX generator which stores energy in capacitor banks over a period of several minutes and then discharges the energy in a time of the order of several nanoseconds into a physically large radiating structure (typical dimensions being of the order of 50 m to 100 m). The radiating structure can behave like a waveguide to conduct the fields to the test object, or it can behave like an antenna radiating in free space. In either case, the test object is illuminated by a transient HEMP field and it responds in the appropriate manner. Typically, the test object should not be greater than one-third to half the height of the working volume of the simulator so as to minimize the plate interaction and to better approximate free-space conditions. Figure 19 illustrates several types of full-scale simulators.



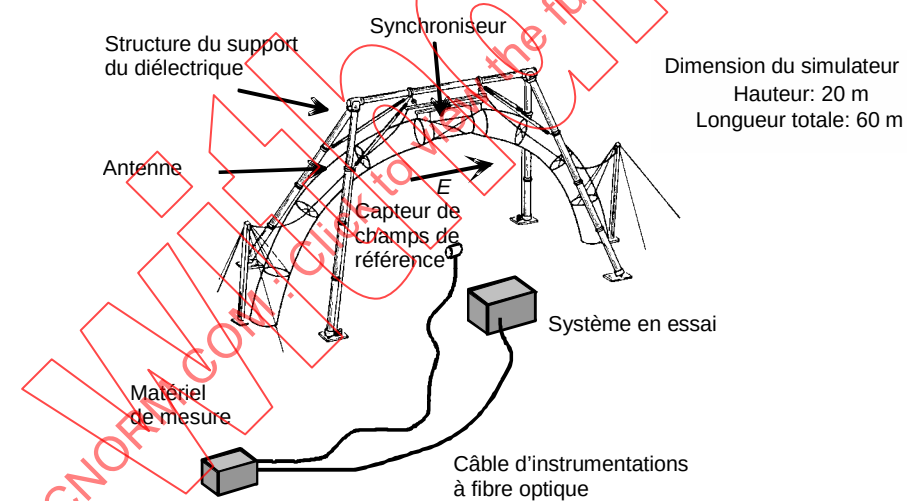
IEC 1721/2000

Figure 19a – A vertically polarized, bounded-wave simulator



IEC 1722/2000

Figure 19b – Autre configuration de simulateur à polarisation verticale à champ confiné



IEC 1723/2000

Figure 19c – Simulateur rayonnant à polarisation horizontale

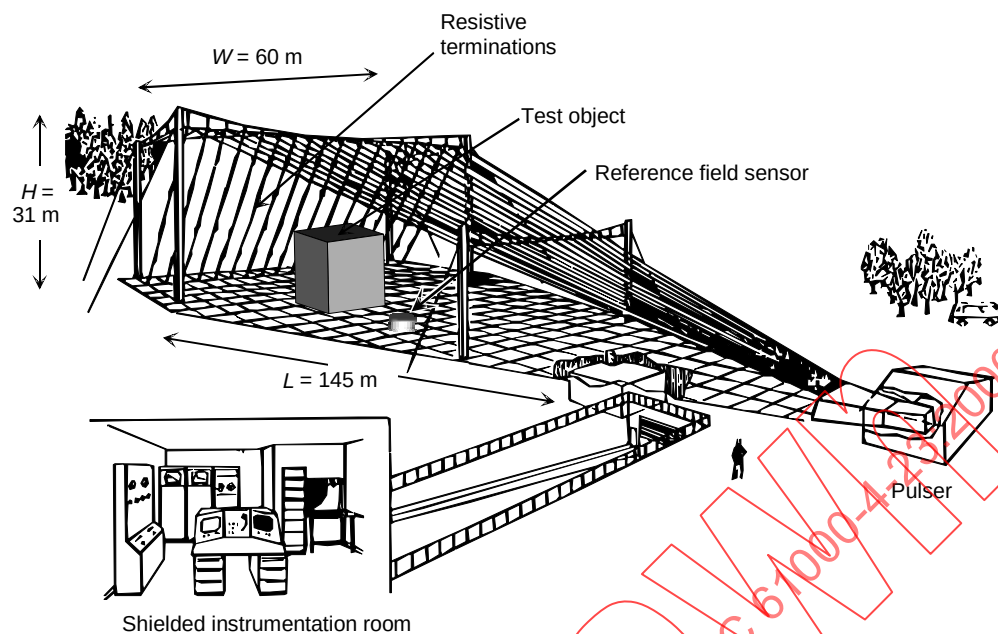


Figure 19b – Alternate configuration for a vertically polarized, bounded-wave simulator

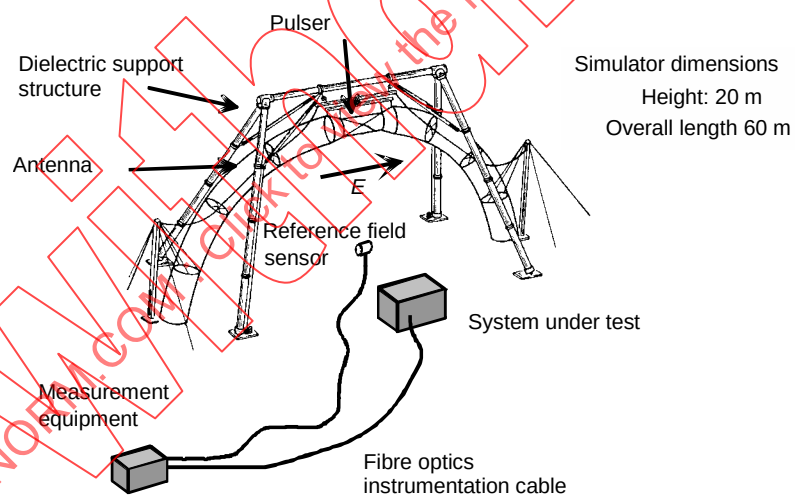
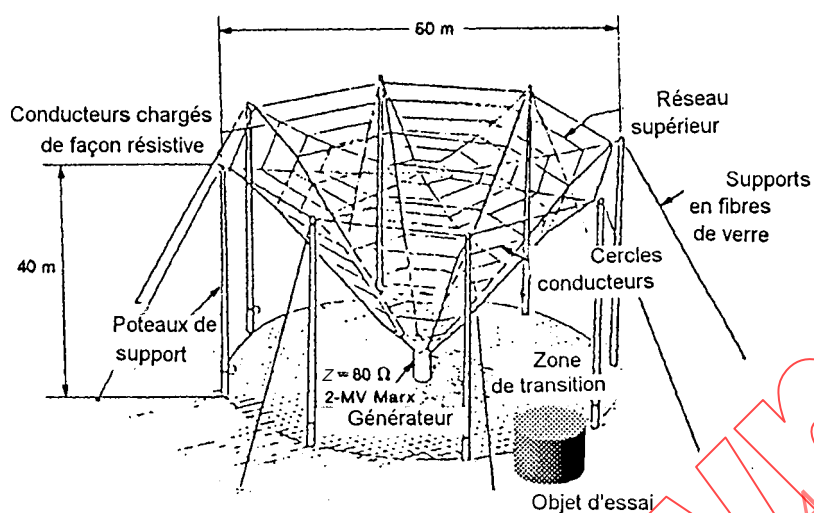
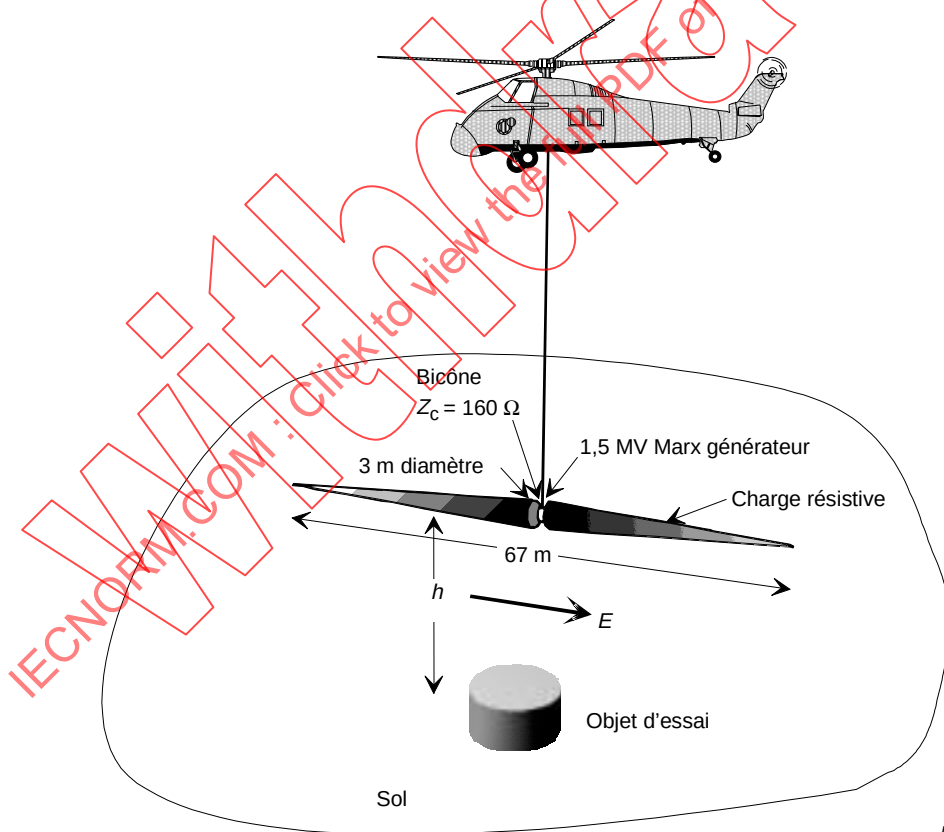


Figure 19c – A horizontally polarized radiating simulator



IEC 1724/2000

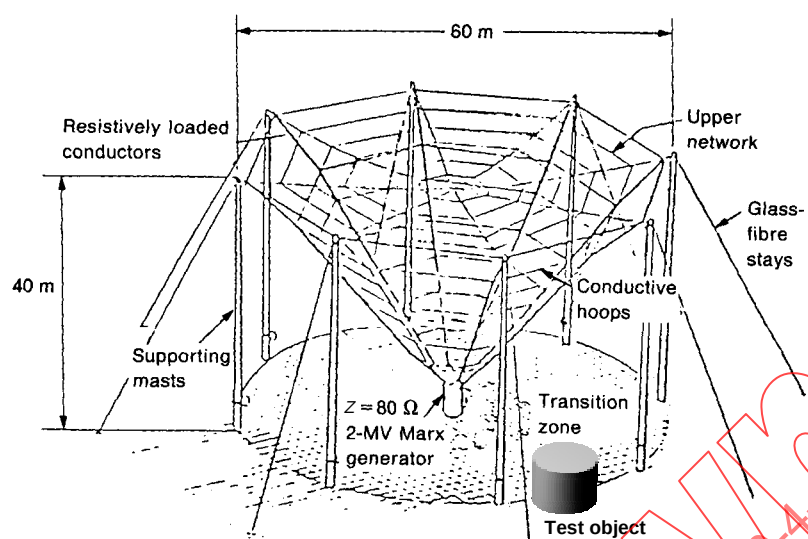
Figure 19d – Simulateur rayonnant à polarisation verticale



IEC 1725/2000

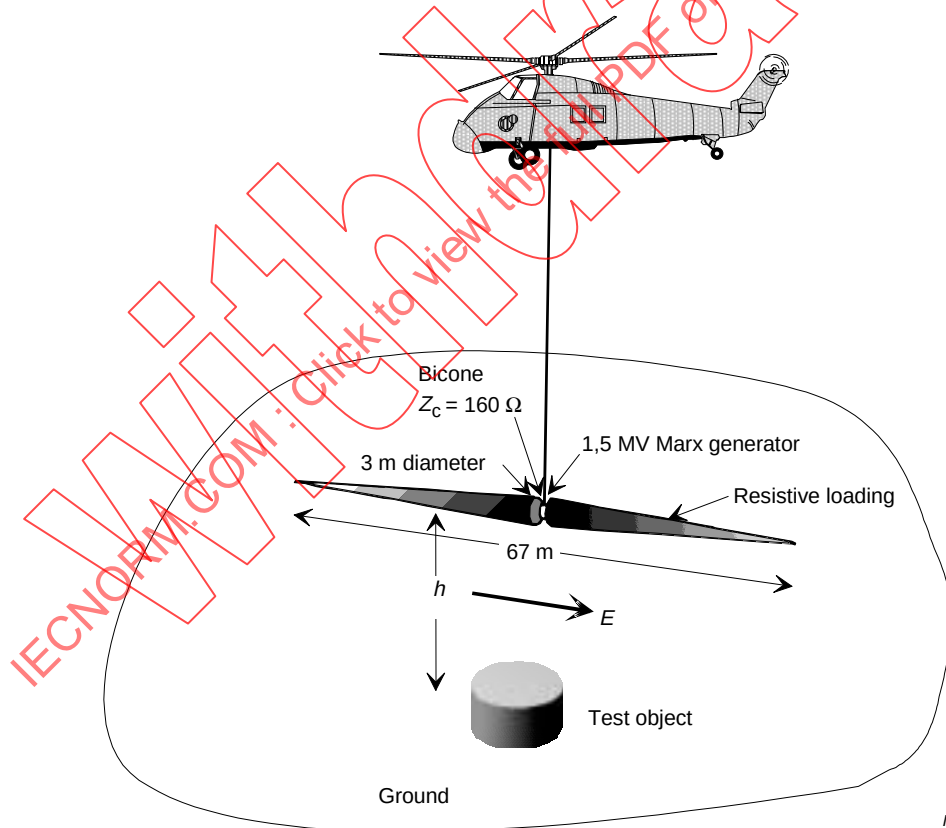
Figure 19e – Simulateur rayonnant à polarisation horizontale aéroporté

Figure 19 – Exemples de simulateurs IEMN-HA rayonnants à impulsion à pleine échelle



IEC 1724/2000

Figure 19d – A vertically polarized radiating simulator



IEC 1725/2000

Figure 19e – An airborne horizontally polarized radiating simulator

Figure 19 – Examples of full-scale, pulse-radiating HEMP simulators

Montage d'essai

La figure 19b illustre le montage d'essai type pour ce type d'essai IEMN-HA. L'objet d'essai est situé dans le «volume de travail» du simulateur. Un capteur de champ de référence est situé dans le volume de travail en un point qui n'est pas affecté de manière significative par les champs diffusés provenant de l'objet d'essai. (Le fabricant de l'installation fournit généralement des informations sur l'emplacement optimisé du volume de travail et du capteur de référence.)

L'objet d'essai est instrumenté en fonction des objectifs de l'essai particulier. Cela implique de placer des détecteurs de champ E ou H , des sondes de courant ou des sondes de tension au niveau de points présélectionnés dans le système, et de les connecter à l'unité d'acquisition de données au moyen de câbles à fibres optiques non conducteurs. En fonction de l'objectif de l'essai, la configuration de l'objet d'essai peut impliquer un raccordement au secteur et à d'autres matériels susceptibles d'affecter les résultats d'essai.

La commande du synchronisateur et du système d'acquisition de données est réalisée dans une salle des machines située sous ou à proximité de la structure du simulateur. Il convient que la conception ne perturbe pas les champs du simulateur; un blindage est généralement fourni de façon à ne pas dégrader l'enregistrement des données et le matériel de traitement.

Matériel d'essai

Outre l'installation du simulateur de base nécessaire pour simuler l'environnement IEMN-HA, le type de matériel suivant est nécessaire pour ce type d'essai:

- capteurs de référence de champ E et H pour la mesure des champs du simulateur d'excitation transitoire;
- capteurs de champ E et H pour la mesure des champs dans le système en essai;
- sondes de courant et de tension pour la mesure de réponses filaires internes;
- équipement d'étalonnage pour toutes les sondes;
- émetteurs, récepteurs à fibres optiques et câble pour extraction de données;
- numériseurs transitoires pour chaque voie de données (temps de montée de 1 ns);
- unité d'acquisition de données et mémoire de grande capacité;
- unité de traitement de données et capacité de traçage.

L'annexe C fournit des précisions sur ces éléments de matériel.

Procédure d'essai

Il s'agit d'un essai transitoire: le synchronisateur est allumé et la réponse transitoire du système est mesurée avec le matériel de numérisation de forme d'onde. Si cet essai est utilisé pour caractériser la première couche de blindage du système, comme défini dans l'annexe A et à l'article 4, il est nécessaire de convertir les réponses transitoires mesurées dans le domaine fréquentiel pour évaluer la fonction de transfert du système $T(\omega)$ ou l'efficacité du blindage, SE . La figure 20 résume les étapes de cette procédure d'essai. Il convient de noter qu'après le calcul du taux de réponse $R(\omega)/F(\omega)$, des corrections de la fonction de transfert peuvent être nécessaires. Cette situation apparaît lorsque la conception du simulateur est telle que le spectre $F(\omega)$ présente une valeur très réduite pour certaines fréquences. Pour ces fréquences, la réponse $R(\omega)$ est dominée par le bruit et le taux peut présenter une pseudo-résonance importante.

Test set-up

Figure 19b illustrates the typical test set-up for this type of HEMP testing. The test object is located in the "working volume" of the simulator. A reference field sensor is located in the working volume at a location where it will not be severely affected by the scattered fields from the test object. (The manufacturer of the facility will usually provide information as to the optimum locations of the working volume and reference sensor.)

The test object is instrumented according to the goals of the particular test. This involves placing *E*- or *H*-field probes, current probes or voltage probes at pre-selected points within the system, and connecting these to the data acquisition computer by means of the non-conducting fibre optic cables. Depending on the test objective, the test object configuration may involve connections to the power mains and to other connected equipment, which can affect the test results.

Control of the pulser and the data acquisition system is carried out in an equipment room which is located under or near the simulator structure. It should be designed so that it does not interfere with the simulator fields, and it is usually shielded so that the simulation fields do not adversely affect the data recording and processing equipment.

Test equipment

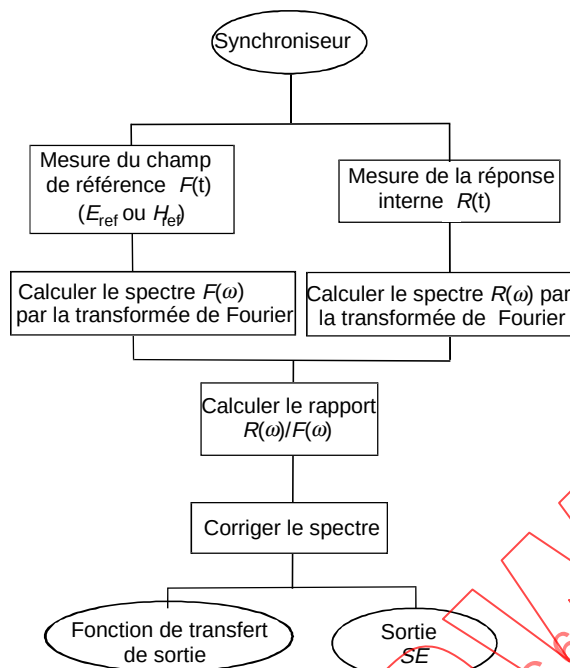
Aside from the basic simulator facility needed to simulate the HEMP environment, the following types of equipment are needed for this type of testing:

- *E*- and *H*-field reference sensors for measuring the transient excitation simulator fields;
- *E*- and *H*-field sensors for measuring fields within the system under test;
- current and voltage sensors for measuring internal wire responses;
- calibration equipment for all sensors;
- fibre optic transmitters, receivers and cable for data extraction;
- transient digitizers for each data channel (rise time of 1 ns);
- data acquisition computer and mass storage medium;
- data processing computer and plot capability.

Details of these equipment items are provided in annex C.

Test procedure

This is a transient test: the pulser is fired and the transient response of the system is measured with the waveform digitizing equipment. If this test is used to characterize the first layer of shielding of the system, as defined in annex A and in clause 4, it is necessary to convert the measured transient responses into the frequency domain to evaluate the system transfer function $T(\omega)$ or the shielding effectiveness, *SE*. Figure 20 summarizes the steps in this test procedure. It should be noted that after the response ratio $R(\omega)/F(\omega)$ has been computed, corrections to the transfer function may be needed. This situation arises when the design of the simulator is such that the spectrum $F(\omega)$ has a very small value at certain frequencies. At these frequencies, the response $R(\omega)$ is dominated by noise and the ratio can have a large pseudo-resonance.



IEC 1726/2000

Figure 20 – Procédure d'essai pour essai d'impulsion

Il est important de réaliser que l'IEMN-HA peut apparaître selon différents angles d'incidence par rapport à l'objet d'essai. Par conséquent, il convient de réaliser la procédure d'essai de la figure 20 pour différentes polarisations du champ d'excitation (si le simulateur le permet) et selon différentes orientations de l'objet d'essai.

5.1.1.2 Petits simulateurs IEMN-HA

Des versions réduites des simulateurs de champ IEMN-HA transitoire à pleine échelle, étudiés en 5.1.1.1, équipent souvent les laboratoires universitaires, les organismes de recherche et les sociétés de fabrication. Ces simulateurs sont similaires aux appareils plus grands, hormis le fait qu'il n'est pas possible de tester des systèmes entiers en raison du faible volume de travail. Généralement, ces simulateurs sont utilisés pour les essais de boîtiers individuels, de petits coffrets ou de câbles.

La petite taille de ces simulateurs permet d'obtenir des temps de montée de champs plus rapides que dans les simulateurs plus grands à pleine échelle. Cependant, les tensions maximales du synchronisateur et, par conséquent, les intensités maximales de champ E et H sont limitées par les caractéristiques de coupure diélectriques de l'air à proximité de la section d'alimentation.

Le matériel d'essai, le montage et les procédures d'essai pour ces simulateurs de petite taille sont identiques aux éléments indiqués en 5.1.1.1.

5.1.2 Essais de champ en ondes non modulées

Pour remplacer les essais d'impulsion, il est possible de réaliser les mesures dans le domaine fréquentiel. Ces essais sont beaucoup moins onéreux que les essais transitoires, du fait du coût relativement faible du matériel utilisé. De plus, étant donné qu'il est possible de rester sur chaque fréquence pendant une durée longue, cette méthode d'essai peut être utilisée pour des systèmes fortement blindés dans lesquels les essais d'impulsion sont inefficaces en raison de la faible intensité de signal.

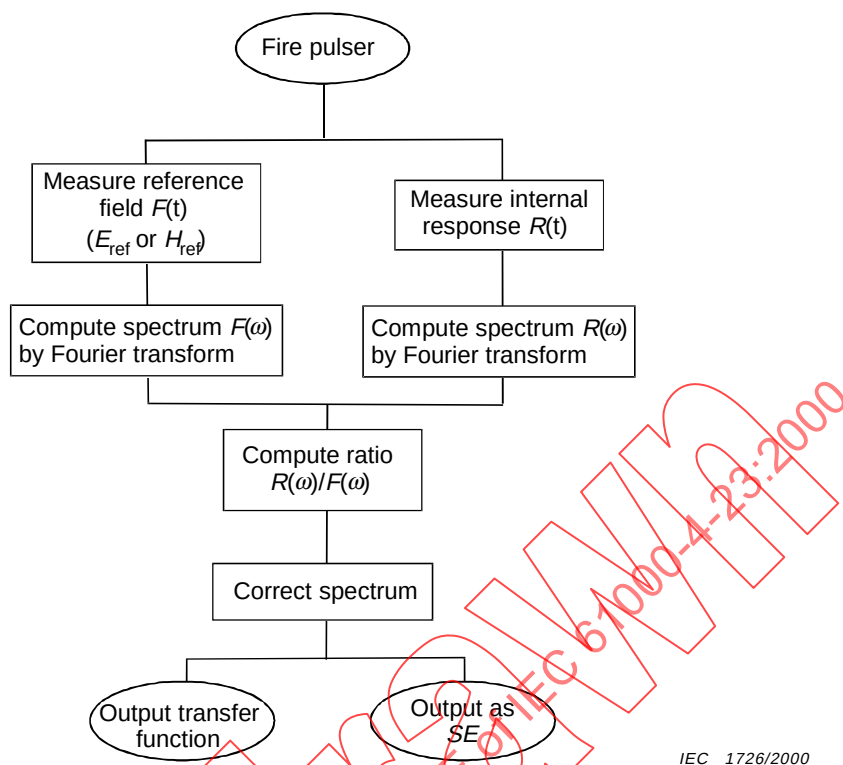


Figure 20 – Test procedure for the pulse test

It is important to realize that HEMP can arrive with different angles of incidence relative to the test object. Therefore, the test procedure in figure 20 should be carried out for different polarizations of the excitation field (if permitted by the simulator) and with different orientations of the test object.

5.1.1.2 Small HEMP simulators

Smaller versions of the full-scale transient HEMP field simulators discussed in 5.1.1.1 are often found in university laboratories, research organizations and manufacturing companies. These simulators are similar to their larger counterparts, with the exception that entire systems cannot be tested, due to the small working volume. Usually, these simulators are used to test individual boxes, small cabinets or cables.

The small size of these simulators provides a benefit that the rise times of the fields are usually faster than in the larger, full-scale simulators. However, the peak voltages of the pulser, and consequently the peak E - and H -field strengths, are limited by the dielectric breakdown characteristics of the air near the feeding section.

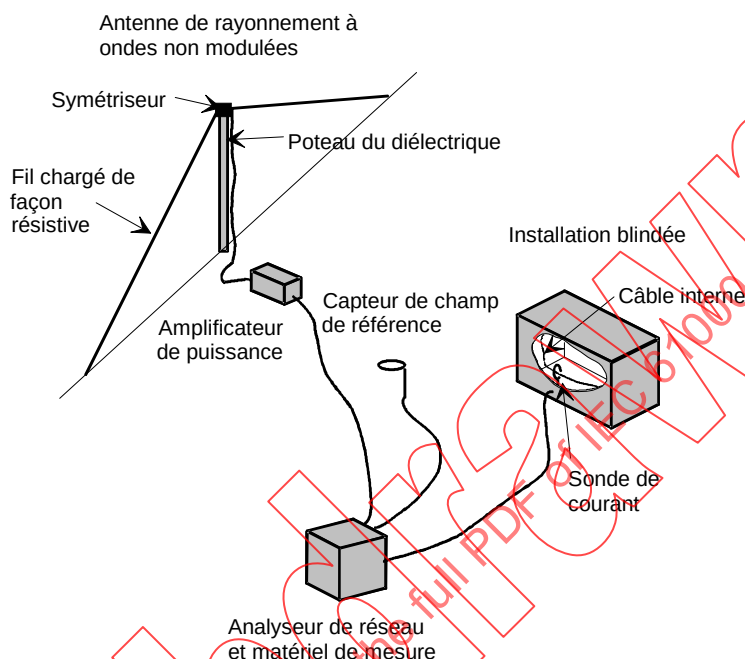
The test equipment, test set-up and procedures for these small-scale simulators are the same as indicated in 5.1.1.1.

5.1.2 CW field testing

An alternative to pulse testing is to make the measurements in the frequency domain. Such tests are significantly less expensive than the transient tests, due to the relatively inexpensive equipment involved. Moreover, because it is possible to dwell on each frequency for a long time, this test method can be used for highly shielded systems in which pulse testing is inefficient due to the low signal strength.

5.1.2.1 Illumination globale avec radiateurs actifs

La figure 21 présente une configuration d'essai type pour un essai en régime continu. Cette figure montre l'installation en essai, l'antenne en régime continu, l'enceinte du matériel de mesure et les connexions de câble associées. Le matériel de mesure est situé sur le sol à proximité de l'installation. Du fait qu'il s'agit d'un essai d'illumination de champ, il est important de placer l'antenne en régime continu à plusieurs longueurs d'onde au moins de l'installation de façon que le champ illuminateur apparaisse comme une onde plane.



IEC 1727/2000

Figure 21 – Configuration type d'une installation d'essai à ondes non modulées

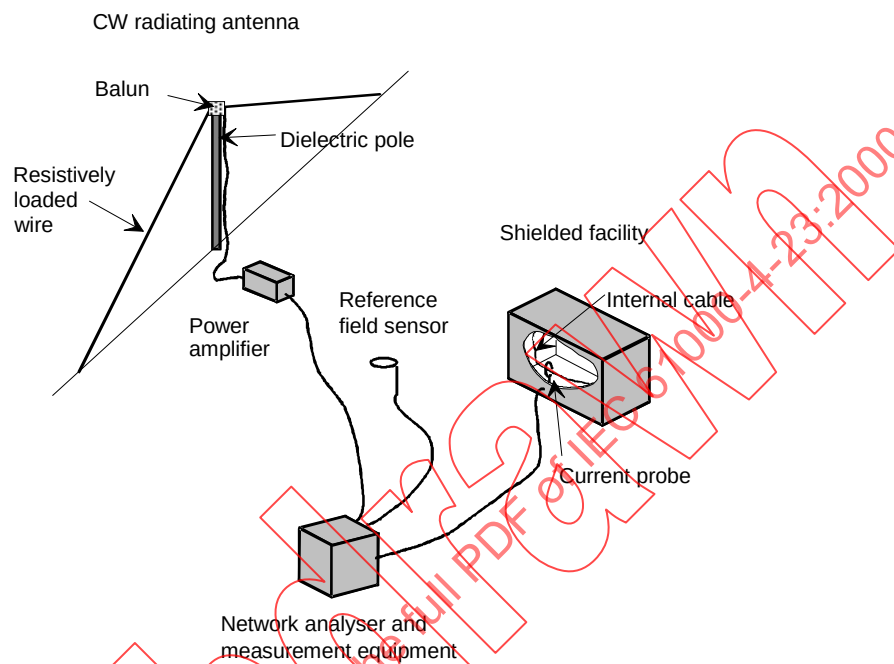
Montage d'essai

La figure 22 illustre les particularités du montage de mesure à ondes non modulées. Au cœur du système se trouve un analyseur de réseau, qui possède la capacité de mesurer deux réponses simultanément, une voie de référence et une voie A, qui représente la réponse souhaitée du système. L'analyseur de réseau est contrôlé par un ordinateur personnel (PC) au moyen d'interfaces d'instrumentation normalisées, par exemple l'IEEE 488 ou la CEI 60625. Il convient de placer les pièces dans une zone blindée, largement à l'écart du champ rayonné produit par le champ incident de l'antenne à ondes non modulées.

Un ordinateur d'analyse de données est associé à l'ordinateur de mesure. Cette fonction d'analyse peut être intégrée dans l'ordinateur de mesure lui-même ou peut être remplie par un ordinateur distinct, relié directement à l'ordinateur de mesure par un bus RS-232 ou IEEE ou indirectement en transférant les données acquises, stockées sur un support d'enregistrement portable.

5.1.2.1 Global illumination with active radiators

A typical test configuration for a CW test is shown in figure 21. This figure shows the facility being tested, the CW antenna, the measurement equipment enclosure and associated cable connections. The measuring equipment is located on the ground near the facility. Because this is a field illumination test, it is important to have the CW radiating antenna located at least several wavelengths from the facility so that the illuminating field appears as a plane wave.



IEC 1727/2000

Figure 21 – Typical configuration of a CW test facility

Test set-up

Figure 22 illustrates the details of the CW measurement set-up. The heart of the system is a network analyser, which has the capability of measuring two responses simultaneously: a reference channel and channel A, which is the desired system response. The network analyser is controlled by a personal computer (PC) by way of the standard instrumentation interfaces, e.g. IEEE 488 or IEC 60625. Both pieces of equipment should be located in a shielded region, well away from the radiated field produced by the incident field of the CW antenna.

Associated with the measurement computer is a data analysis computer. This analysis function can be contained within the measurement computer itself, or it can be performed by a separate computer, linked directly to the measurement computer by an RS-232 or IEEE bus, or linked indirectly by passing acquired data stored on portable recording media.

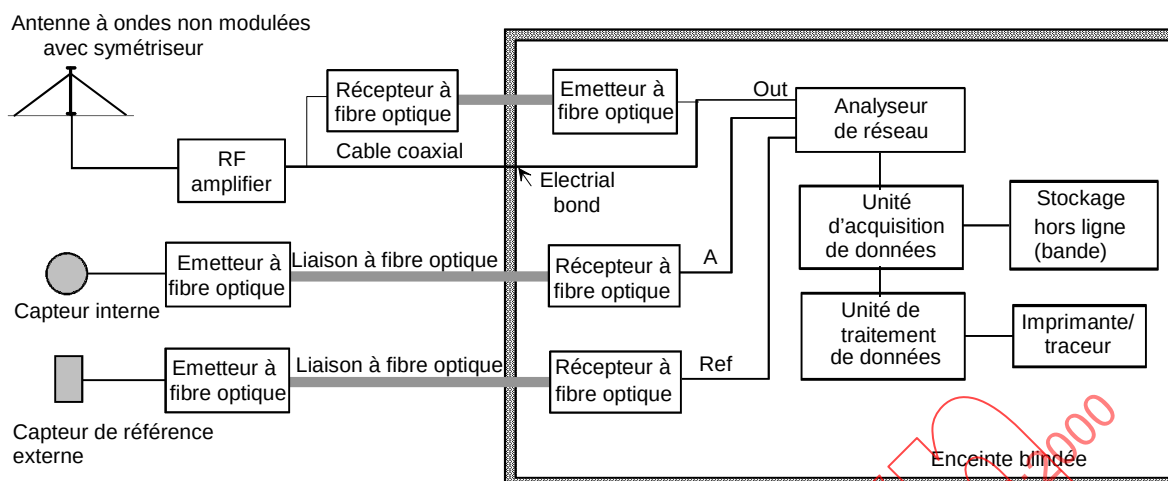


Figure 22 – Montage de mesure à ondes non modulées

IEC 1728/2000

Il convient que les sondes de champ externe/de courant pour les voies de référence et de mesure n'enfreignent pas la topologie de blindage autour du matériel de mesure. Une façon courante d'assurer un blindage est d'utiliser des liaisons à fibres optiques pour ces deux voies, ce qui nécessite une conversion des signaux électriques au niveau des sondes en signaux optiques au moyen d'un émetteur à fibres optiques, la transmission des signaux optiques via un câble optique et la reconstitution du signal électrique dans l'enceinte du matériel par un récepteur à fibres optiques.

L'analyseur de réseau fournit un signal de sortie à fréquence radioélectrique, balayé sur la gamme de fréquences concernée. Ce signal est transmis via un câble coaxial de 50 Ω à un amplificateur de puissance à fréquence radioélectrique, qui augmente le niveau de signal puis le transmet à une antenne spécialement conçue pour rayonner le signal.

Il convient que le blindage du câble coaxial soit électriquement relié à l'enceinte du matériel blindé au niveau du point de pénétration pour isoler les zones externes et internes, comme indiqué à la figure 22. En outre, des atténuateurs à perles de ferrite peuvent être situés à environ 30 cm d'intervalle le long du câble pour contribuer à minimiser le couplage de champ extérieur parasite et la propagation le long du câble. Une méthode alternative à l'utilisation d'une connexion câblée entre l'analyseur de réseau et l'amplificateur est l'utilisation d'une liaison à fibres optiques, comme illustré à la figure 22.

Matériel d'essai

Pour cet essai, les types de matériel suivants sont nécessaires:

- antenne rayonnante à ondes non modulées;
- amplificateur de puissance;
- analyseur de réseau;
- sondes de référence et de réponse;
- système de transmission à fibres optiques;
- unité d'acquisition de données et mémoire de grande capacité;
- unité de traitement de données et capacité de traçage.

L'annexe D fournit des informations pertinentes sur ce matériel.

Procédure d'essai

Pour s'assurer que l'essai à ondes non modulées est réalisé correctement, il convient de réaliser une série d'étapes de montage du matériel de mesure et de réalisation des mesures. Comme indiqué à la figure 23, ces procédures comportent des activités directement liées à la conduite de l'essai (désignées par «activité d'essai à ondes non modulées»). L'autre analyse inclut des tâches (appelées «activité de traitement de données en régime continu») qui servent à assurer que la configuration d'essai est correcte et que les données d'essai sont de qualité suffisante pour l'analyse de données et pour réaliser finalement l'analyse souhaitée sur les données mesurées en ondes non modulées.

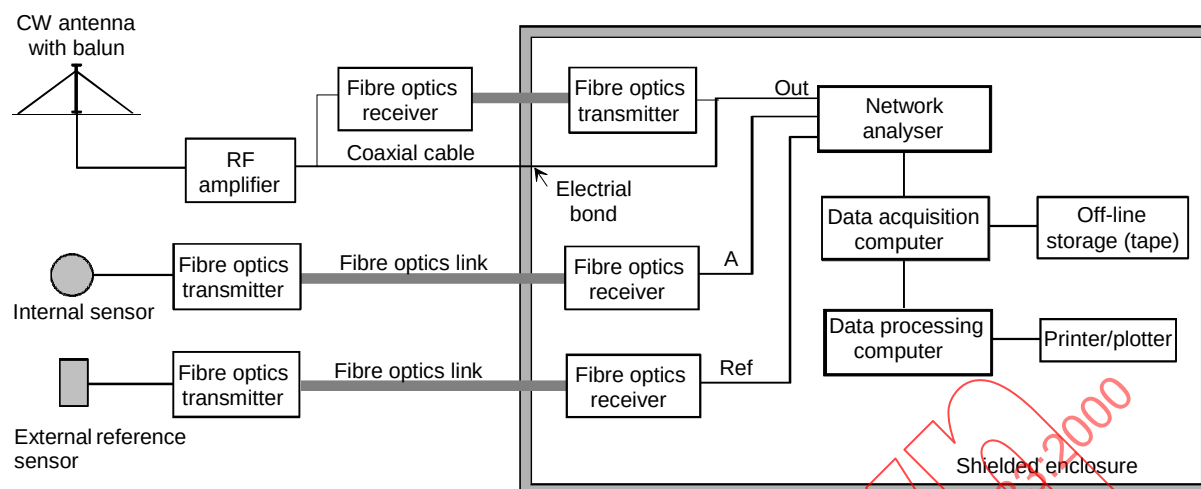


Figure 22 – The CW measurement set-up

IEC 1728/2000

The external field/current sensors for the reference and the measurement channels should not violate the shield topology surrounding the measurement equipment. A common way of ensuring that the shielding is maintained is to use fibre optic links for both of these channels. This requires a conversion of the electrical signals at the sensors to optical signals by means of a fibre optics transmitter, the transmission of the optical signals via an optical cable, and the reconstitution of the electrical signal within the equipment enclosure by a fibre optics receiver.

The network analyser provides an output RF signal which is swept over the frequency range of interest. This signal is transmitted via a 50 Ω coaxial cable to an RF power amplifier, which boosts the signal level and then feeds it to a specially designed antenna to radiate the signal.

The coaxial cable shield should be electrically bonded to the shielded equipment enclosure at the penetration point to isolate the external and internal regions, as indicated in figure 22. In addition, ferrite bead attenuators can be located at about 30 cm intervals along the cable to help minimize the unwanted external field coupling and propagation along the cable. An alternative to the use of a hard-wired connection between the network analyser and the amplifier is to use a fibre optics link, as illustrated in figure 22.

Test equipment

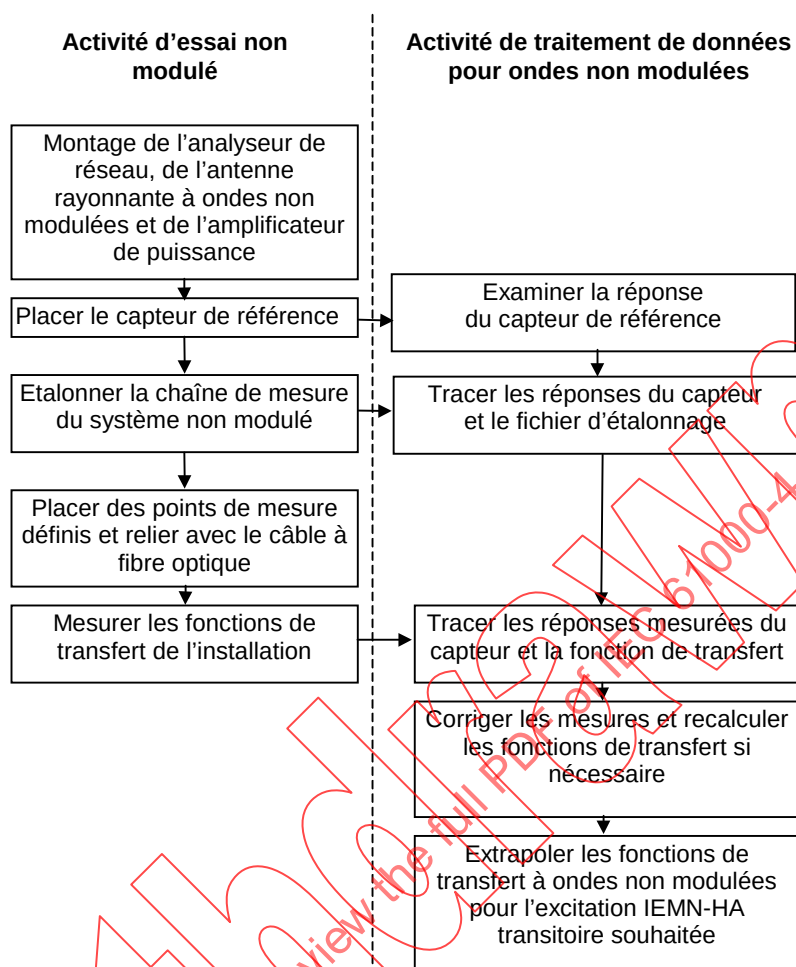
For this test, the following types of equipment are needed:

- CW radiating antenna;
- power amplifier;
- network analyser;
- reference and response sensors;
- fibre optics transmission system;
- data acquisition computer and mass storage medium;
- data processing computer and plot capability.

Pertinent details of this equipment are discussed in annex D.

Test procedure

To ensure that the CW test is conducted properly, a series of steps should be performed in setting up the measurement equipment and conducting the measurements. As shown in figure 23, these procedures consist of activities that pertain directly to the conduct of the test (labelled as "CW test activity"). The other analysis support tasks (denoted as "CW data processing activity") serve to ensure that the test configuration is correct and that the test data are of sufficient quality for the data analysis, and finally to perform the desired analysis on the measured CW data.

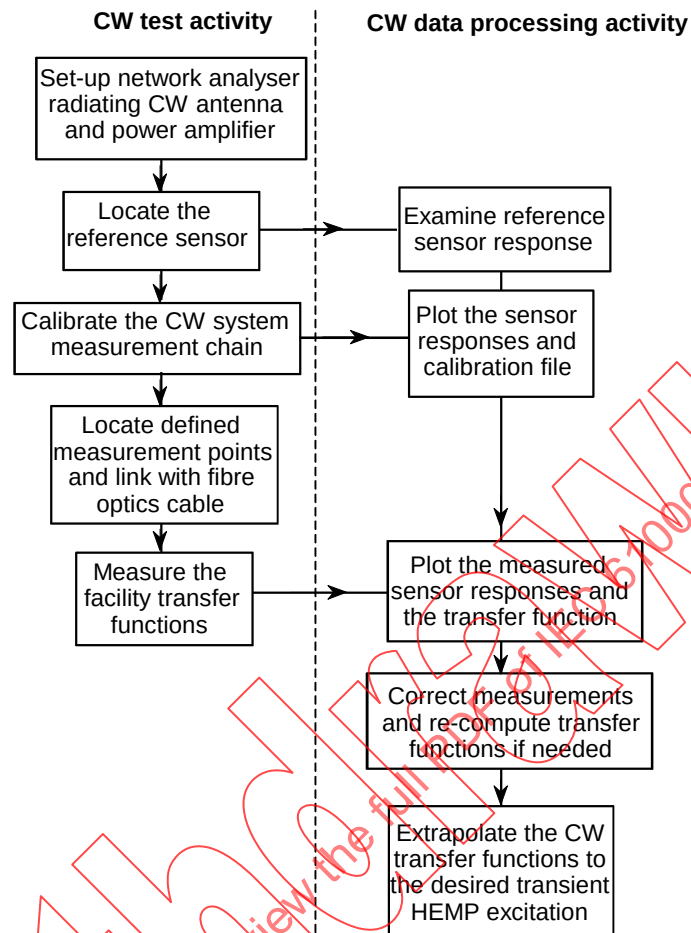


IEC 1729/2000

Figure 23 – Procédures d'essai et d'analyse pour la réalisation d'un essai à ondes non modulées

La première étape, dans la réalisation d'un essai à ondes non modulées, consiste à décider de l'emplacement de l'antenne d'essai. Dans la largeur de l'antenne, le champ EM rayonné présente une polarisation principalement horizontale. Ainsi, cette antenne à ondes non modulées convient pour simuler l'effet d'un champ IEMN-HA incident, à polarisation horizontale. L'annexe D fournit des indications sur l'emplacement de l'antenne.

Une fois que l'emplacement de l'antenne est fixé, la sonde de référence est sélectionnée et les étalonnages des sondes de réponse et de référence sont réalisés. L'étape suivante, dans la procédure d'essai, consiste à situer les points de mesure souhaités (vraisemblablement dans l'installation ou l'objet d'essai), connecter les sondes étalonnées précédemment et acheminer les câbles à fibres optiques du transducteur à proximité de l'analyseur de réseau jusqu'à l'emplacement de mesure. Pour ce faire, il convient de veiller à ne pas déranger la topologie de blindage de l'objet d'essai. Par exemple, même si les câbles à fibres optiques ne transmettent pas de signaux électriques, s'ils traversent une porte en direction d'une enceinte blindée, cette porte doit rester ouverte pour laisser passer le câble. Une telle porte ouverte représente une violation du blindage; il convient donc de l'éviter.



IEC 1729/2000

Figure 23 – Test and analysis procedures for conducting a CW test

The first step in conducting the CW test is to decide upon the location of the CW test antenna. In the direction broadside to the antenna, the radiated EM field is primarily horizontally polarized. Thus, this CW antenna is suitable for simulating the effect of an incident horizontally polarized HEMP field. Details of antenna placement are provided in annex D.

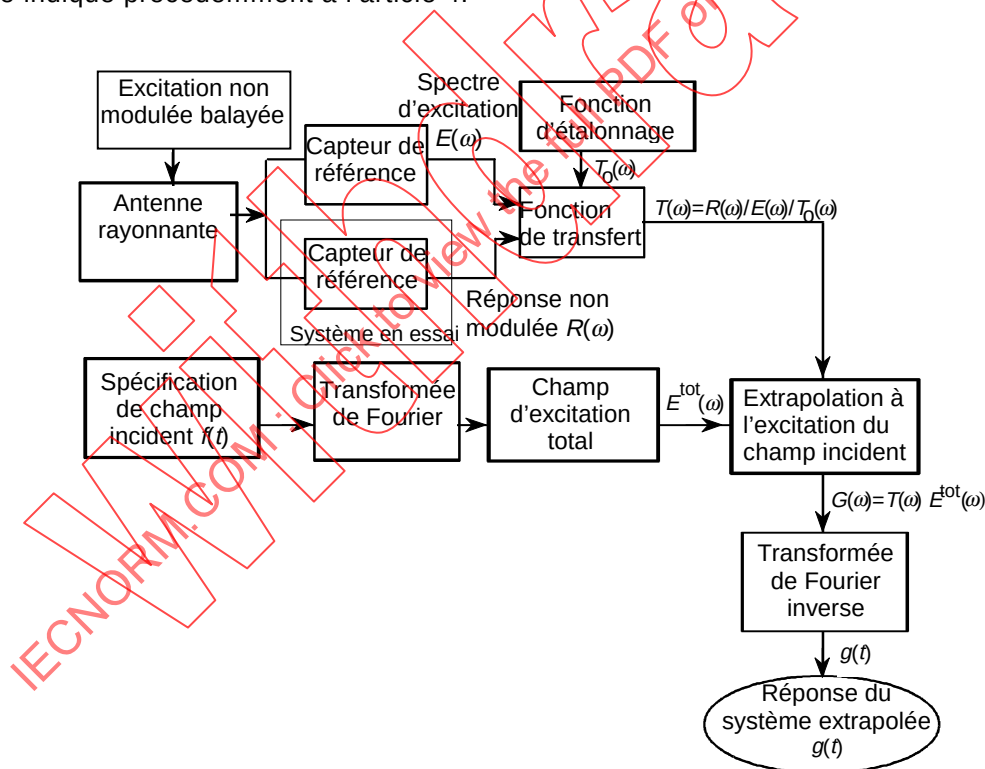
Once the antenna location is fixed, the reference sensor is selected and the calibrations of the response and reference sensors are performed. The next step in the CW test procedure is to locate the desired measurement points (presumably within the facility or test object), connect the previously calibrated sensors, and run the fibre optic cables from the transducer near the network analyser to the measurement location. In doing this, care should be taken to ensure that the shielding topology of the test object is not violated. For example, even though the fibre optic cables do not conduct electrical signals, if they pass through a door into a shielded enclosure, the door shall remain open to let the cable pass. Such an open door constitutes a shielding violation and should be avoided.

En raccordant le matériel approprié au niveau des points de mesure internes, on peut suivre le processus de mesure, en réalisant la mesure simultanée des sondes de référence et de réponse. Généralement, la fonction de transfert d'étalonnage $T_0(\omega)$ est appliquée à ces réponses durant le processus de mesure et trois fichiers de données en résultent pour chacune des mesures:

- le spectre de la sonde de référence;
- le spectre de la sonde de réponse;
- la fonction de transfert corrigée.

Comme indiqué à la figure 23, il convient, parallèlement aux mesures, de réaliser l'analyse de données avec un traçage de ces fichiers de données et un examen préliminaire pour évaluer si les résultats obtenus sont raisonnables. Si des points négatifs apparaissent au niveau des données des réponses de sonde, il convient de les vérifier et de calculer une nouvelle fonction de transfert.

A l'issue des mesures des fonctions de transfert, la tâche restante consiste à traiter les données mesurées, comme l'indique la figure 23. Généralement, pour un essai à ondes non modulées, il s'agira de convertir le spectre de la fonction de transfert mesurée (et corrigée) en une réponse IEMN-HA transitoire du système. Pour décrire ce processus d'extrapolation, on peut utiliser le diagramme de la figure 24. De plus, si l'on souhaite uniquement obtenir la valeur d'efficacité de blindage de l'enceinte, cette grandeur peut être déterminée à partir de la fonction de transfert, comme indiqué précédemment à l'article 4.



IEC 1730/2000

Figure 24 – Diagramme d'analyse pour l'extrapolation d'un spectre à ondes non modulées mesuré au niveau de la réponse IEMN-HA

5.1.2.2 Illumination globale par des sources non modulées existantes

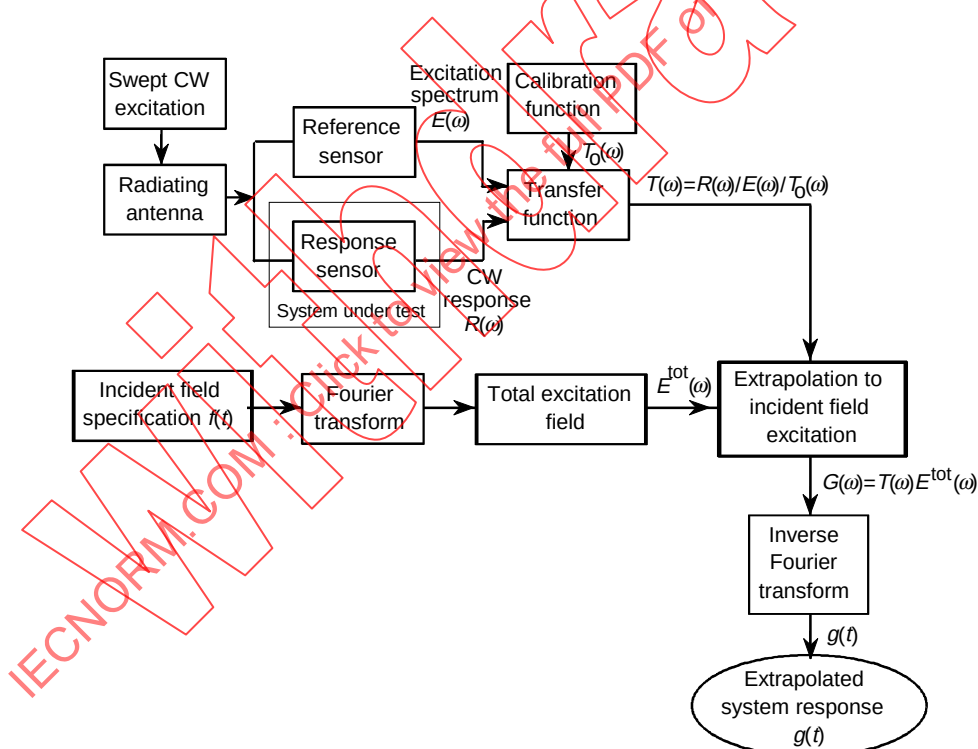
Pour remplacer les essais à ondes non modulées ou les essais d'impulsions d'un système utilisant un émetteur actif et une antenne, on peut utiliser une approche passive, dans laquelle les signaux EM ambiants, autour du système, fournissent l'excitation. Ces signaux sont générés par des émetteurs stationnaires et mobiles, on peut, par conséquent, constater une grande variabilité des résultats.

With the appropriate equipment connected at the internal measurement points, the measurement process can proceed, with the simultaneous measurement of the reference and the response sensors. Generally, the calibration transfer function $T_0(\omega)$ is applied to these responses during the measurement process and, as a result, there are three data files provided for each measurement:

- the reference sensor spectrum;
- the response sensor spectrum;
- the corrected transfer function.

As noted in figure 23, concurrent with the measurements, data analysis should be performed, with plotting of these data files, and a preliminary examination of the reasonableness of the results should be made. If there are any bad data points in either of the sensor responses, they should be checked and a new transfer function calculated.

After the measurements of the transfer functions are completed, figure 23 indicates that the remaining task is the processing of the measured data. Usually, for a CW test, this will involve taking the measured (and corrected) transfer function spectrum and converting it to a transient, HEMP response of the system. To describe this extrapolation process, the signal flow diagram shown in figure 24 can be used. In addition, if only the shielding effectiveness of the enclosure is desired, this quantity can be determined from the transfer function, as discussed previously in clause 4.



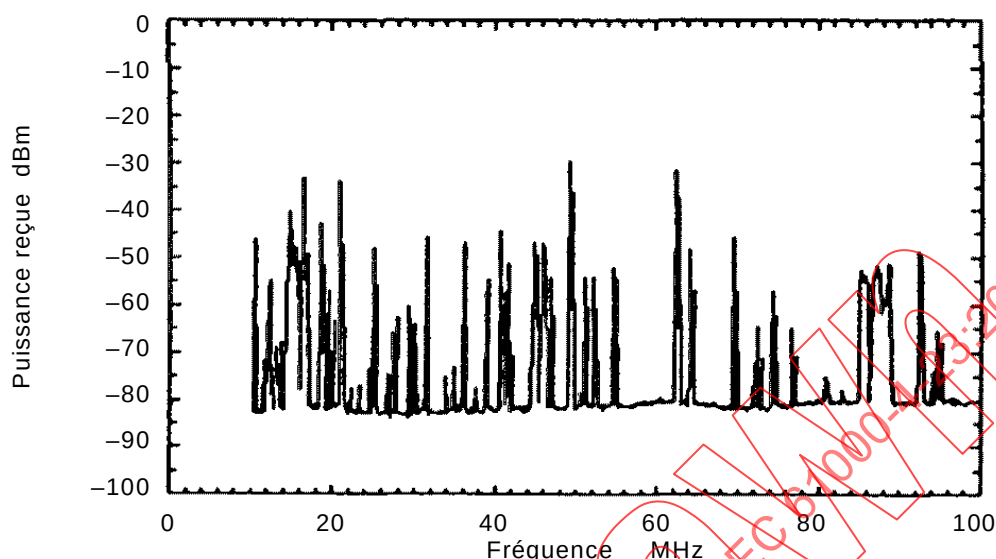
IEC 1730/2000

Figure 24 – Analysis flow diagram for extrapolating a measured CW spectrum to the HEMP response

5.1.2.2 Global illumination with existing CW sources

An alternative to the CW or pulse testing of a system, using an active transmitter and antenna, is to consider a passive approach in which ambient EM signals around the system provide the excitation. These signals arise from stationary and mobile transmitters and, consequently, there can be a large variability in the results.

La figure 25 illustre un spectre EM hypothétique pouvant être utilisé pour exciter un objet d'essai de cette manière.



IEC 1731/2000

Figure 25 – Environnement électromagnétique ambiant hypothétique utilisé pour l'excitation globale

Il y a plusieurs avantages à réaliser les essais de cette manière:

- l'environnement EM incident est une onde plane, excitant simultanément l'ensemble du système en essai;
- il n'y a pas d'interférences avec un matériel proche;
- aucun agrément réglementaire (PTT, FCC, etc.) n'est nécessaire;
- l'essai est peu onéreux du fait du coût réduit du matériel;
- il n'existe pas de problème de matériel.

Cette méthode présente toutefois les inconvénients suivants:

- il n'y a pas de contrôle des caractéristiques de l'environnement EM (amplitude, polarisation, etc.);
- le rapport signal sur bruit est faible, ce qui le rend difficile à mesurer dans les régions fortement blindées;
- aucune information de phase ni aucune information spectrale complète n'est disponible, ce qui rend impossible le calcul des réponses transitoires correctes;
- le matériel interne doit être débranché car des niveaux de signal faibles sont fournis par les sources externes.

Montage d'essai

Le montage d'essai, dans ce cas, est similaire à celui de la figure 21, à l'exception de l'antenne d'émission et de l'amplificateur de puissance, qui ne sont pas installés. De plus, l'analyseur de réseau peut être remplacé par un analyseur de spectre, étant donné que les signaux de référence externes et les signaux de réponse internes ne sont pas mesurés.

Figure 25 illustrates a hypothetical EM spectrum which could be used to excite a test object in this manner.

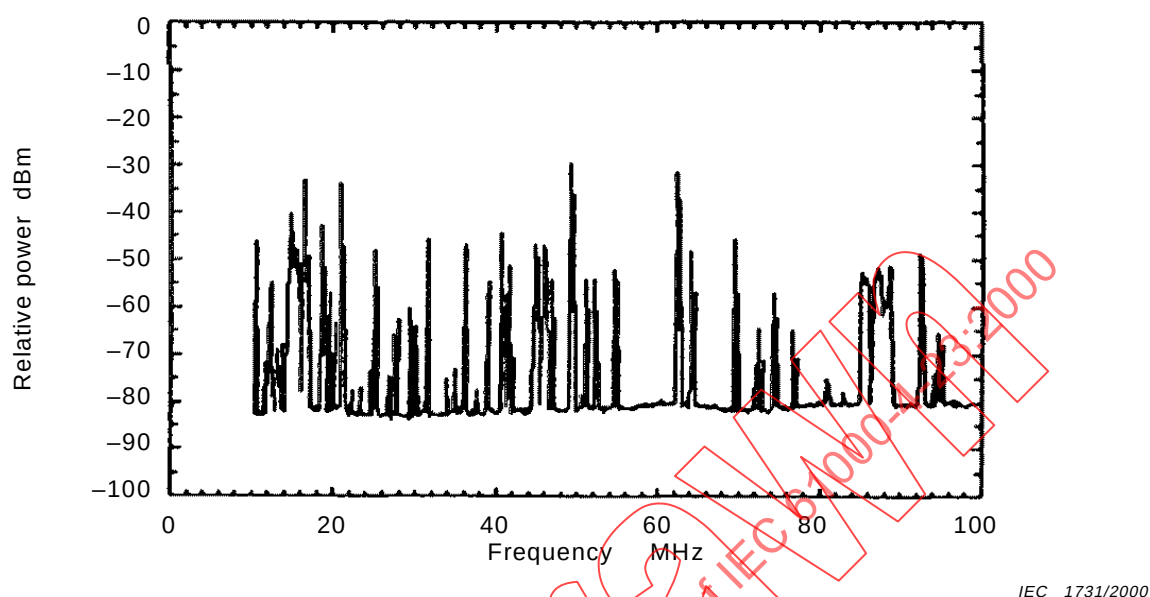


Figure 25 – Hypothetical ambient electromagnetic environment used for global excitation

There are several advantages in performing tests in this manner:

- the incident EM environment is a plane wave, exciting the entire system under test simultaneously;
- there is no interference with nearby equipment;
- no regulatory (PTT, FCC, etc.) approval is needed;
- the test is inexpensive, due to minimal equipment costs;
- there is no equipment liability issue.

However, this method presents the following disadvantages:

- there is no control over the characteristics of the excitation EM environment (amplitude, polarization, etc.);
- the signal/noise ratio is low, making it difficult to measure in highly shielded regions;
- phase information and complete spectral information are not available, making it impossible to calculate the correct transient responses;
- the internal equipment shall be turned off due to the low signal levels provided by the external sources.

Test set-up

The test set-up in this case is similar to that shown in figure 21, except that the transmitting antenna and power amplifier are not present. Moreover, the network analyser may be replaced by a spectrum analyser, as the phases of the external reference and internal response signals are not measured.

Matériel d'essai

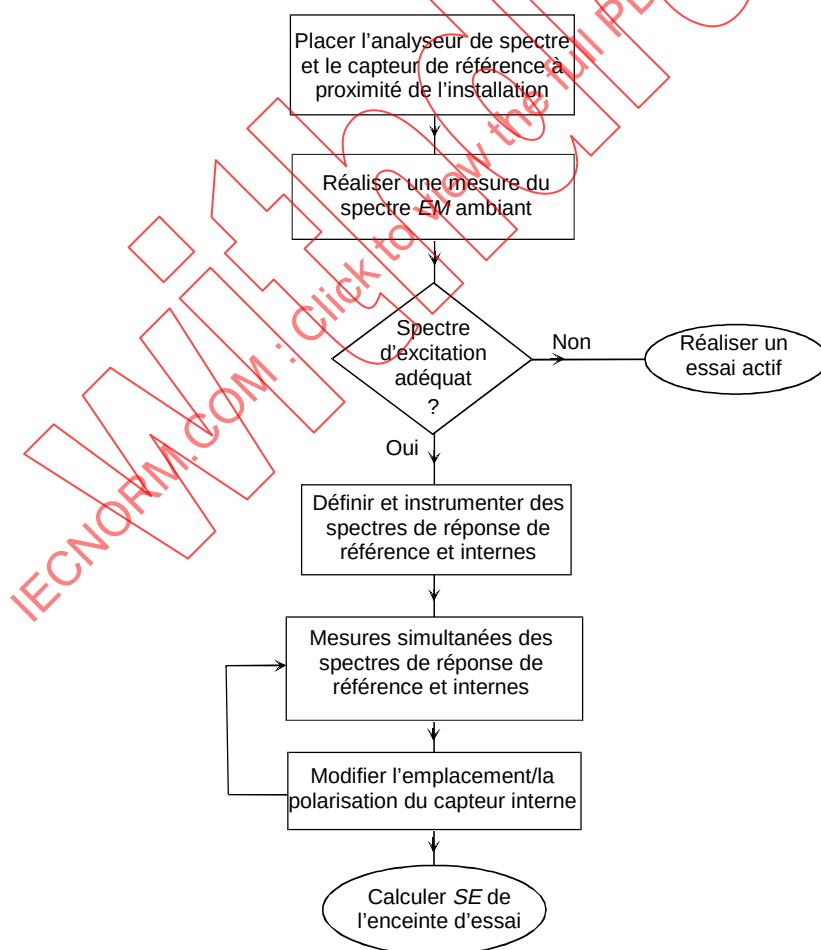
Pour ce concept d'essai, les types de matériel suivants sont nécessaires:

- analyseur de spectre capable d'effectuer des mesures simultanément sur deux voies;
- sondes de référence et de réponse;
- système de transmission à fibres optiques;
- unité d'acquisition de données et mémoire de grande capacité;
- unité de traitement de données et capacité de traçage.

Procédure d'essai

La procédure d'essai est illustrée à la figure 26. Il est important de réaliser, avant l'essai, une évaluation de l'environnement EM ambiant afin de déterminer s'il est adapté à la réalisation de l'essai. S'il n'existe pas suffisamment d'émissions de champ EM sur la largeur de bande souhaitée, il est nécessaire de réaliser un essai d'impulsion ou d'ondes non modulées.

Un des aspects importants de ce type d'essai consiste à s'assurer que les mesures des réponses internes et de référence sont réalisées simultanément. En raison des changements d'environnement EM ambiant en fonction du temps, il n'existe aucune garantie que les champs incidents soient constants. Si les mesures de ces réponses ne sont pas simultanées, des variations d'intensité du signal reçu risquent de donner des valeurs erronées du blindage du système.



IEC 1732/2000

Figure 26 – Procédure d'essai pour essai d'excitation EM ambiant

Test equipment

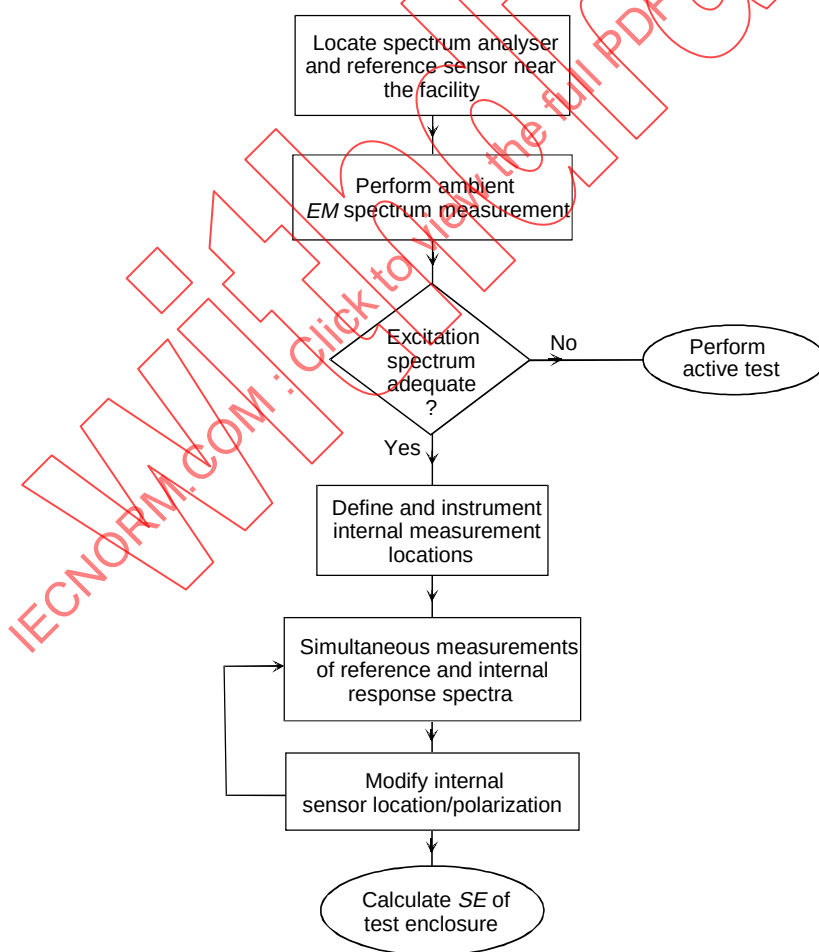
For this test concept, the following types of equipment are needed:

- spectrum analyser capable of simultaneous measurements on two channels;
- reference and response sensors;
- fibre optics transmission system;
- data acquisition computer and mass storage medium;
- data processing computer and plot capability.

Test procedure

The procedure for performing this test is illustrated in figure 26. It is important to perform a pre-test assessment of the ambient EM field environment to determine if it is suitable for performing the test. If there are not enough EM field emissions over the desired bandwidth, then it will be necessary to perform a pulse or CW test.

An important aspect of this type of test is to ensure that the measurements of the internal and reference responses are performed simultaneously. Because the ambient EM environment changes as a function of time, there is no guarantee that the incident fields will be constant. If the measurements of these responses are not simultaneous, variations of the received signal strengths will mask the shielding of the system.



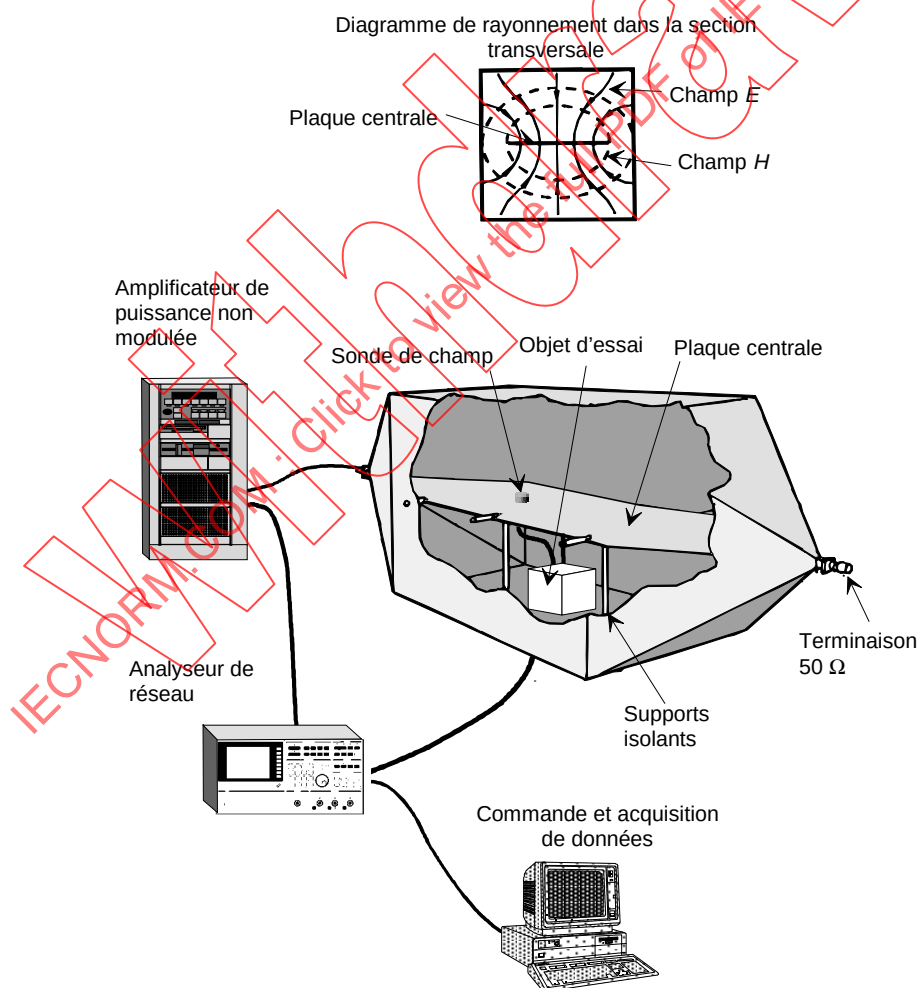
IEC 1732/2000

Figure 26 – Test procedure for the ambient EM excitation test

5.1.2.3 Cellule TEM à double extrémité

La cellule TEM à double extrémité permet aussi de produire un environnement de champ EM uniforme et contrôlé pour l'excitation globale d'une enceinte blindée. Ce dispositif est semblable à une ligne de transmission coaxiale, avec une source à une extrémité et une charge adaptée à l'autre. La source produit un champ EM (TEM) transversal dans la ligne coaxiale qui présente une interaction avec l'objet d'essai situé à l'intérieur de la région coaxiale et subit finalement une absorption par l'impédance de terminaison.

La figure 27 illustre une cellule TEM à double extrémité typique, avec une vue en coupe montrant le conducteur central du système coaxial et l'objet en essai. Si l'objet d'essai n'est pas trop grand par rapport à la section transversale de la cellule, le champ d'excitation peut être considéré comme approximativement uniforme. Du fait que le mode TEM dans ce guide d'onde ne présente aucune coupure de basse fréquence, les essais peuvent être réalisés à très basse fréquence – largement en dessous des fréquences autorisées par une structure d'antenne rayonnante. Cependant, à mesure que la fréquence de fonctionnement augmente, d'autres modes et résonances de type cavité peuvent apparaître; ils limitent effectivement l'installation haute fréquence du dispositif. Les fournisseurs de cellules individuelles TEM fournissent des informations sur les largeurs de bande utilisables de leur matériel, qui varient en général de plusieurs dizaines de kilohertz à 100 MHz pour les cellules présentant un volume de travail de l'ordre de 1 m de hauteur.



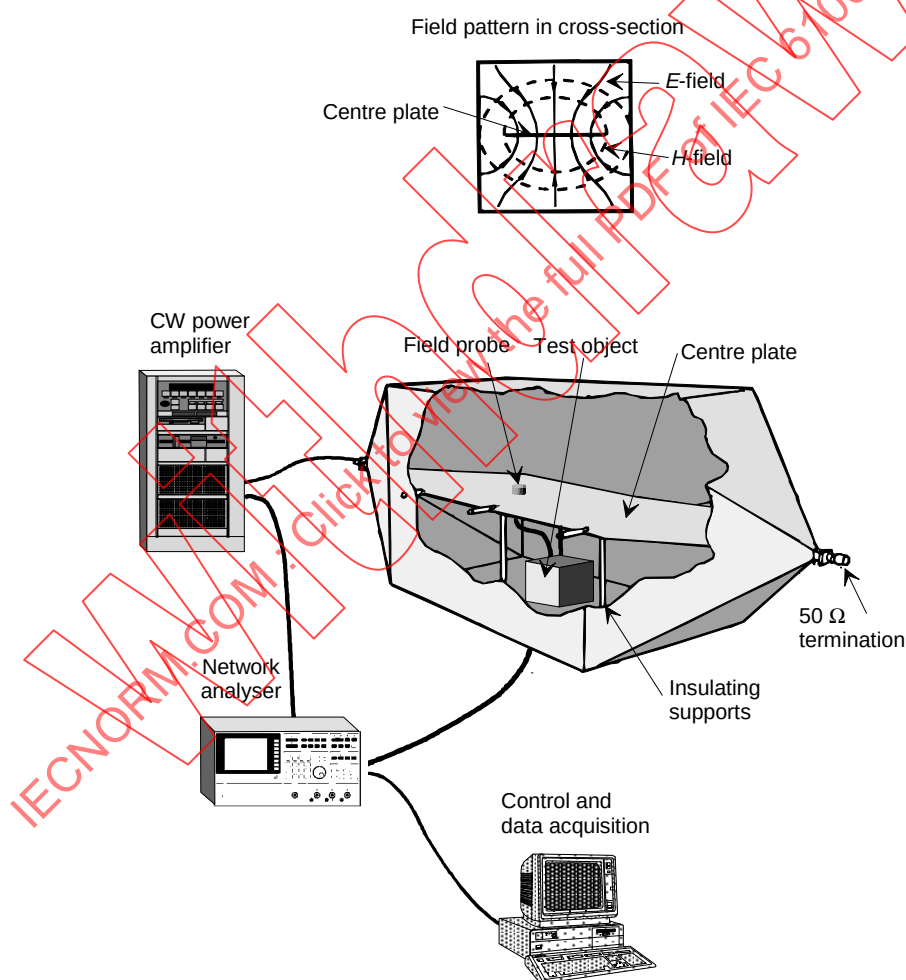
IEC 1733/2000

Figure 27 – Cellule TEM à double extrémité pour essai d'illumination de champ sur enceintes réduites

5.1.2.3 Double-ended TEM cell

The double-ended TEM cell is another way of producing a uniform and controlled EM field environment for globally exciting a shielded enclosure. This device is like a coaxial transmission line, with a source at one end and a matched load at another. The source produces a transverse EM (TEM) field within the coaxial line which interacts with the test object located inside the coaxial region, and is ultimately absorbed by the termination impedance.

Figure 27 illustrates a typical double-ended TEM cell, with a cut-away view showing the centre conductor of the coaxial system and the object under test. As long as the test object is not too large compared with the cross-section of the cell, the excitation field can be taken to be approximately uniform. Because the TEM mode in this waveguide has no low-frequency cut-off, the testing may be conducted at very low frequencies – well below the frequencies permitted by a radiating antenna structure. As the frequency of operation increases, however, other modes and cavity type resonances can occur; these effectively limit the high-frequency utility of the device. Suppliers of individual TEM cells provide information as to the usable bandwidths of their equipment, which typically range from several tens of kilohertz to 100 MHz for cells having a working volume in the order of a metre in height.

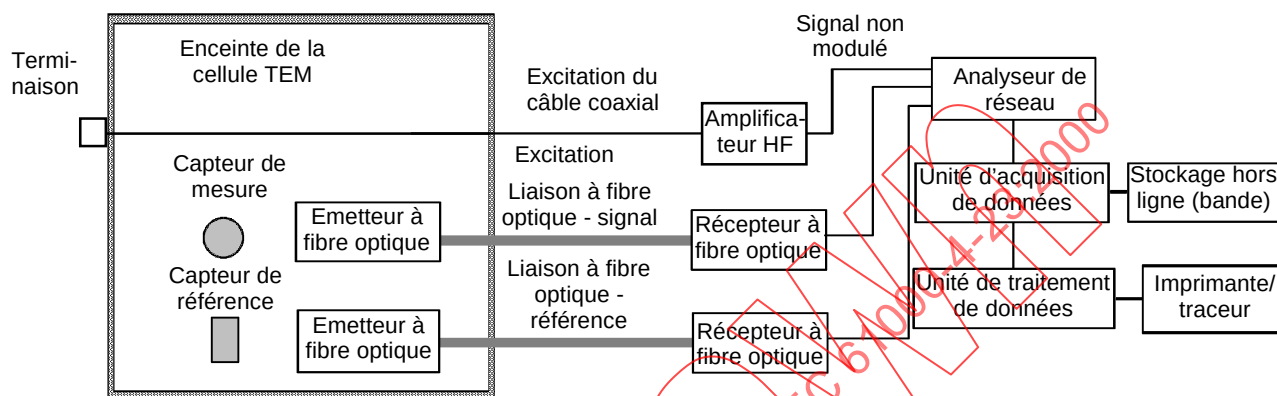


IEC 1733/2000

Figure 27 – Double-ended TEM cell for field illumination testing of small enclosures

Montage d'essai

Le montage d'essai pour la cellule TEM est similaire à celui utilisé pour les essais d'illumination de champ à ondes non modulées étudiés en 5.1.2.1, à l'exception de l'enceinte blindée englobante dans le cas des ondes non modulées, qui n'est pas nécessaire du fait de la présence du blindage autour de la cellule TEM. La figure 28 illustre les connexions du matériel pour cet essai.



IEC 1734/2000

Figure 28 – Montage d'essai pour l'illumination de champ dans la cellule TEM

Matériel d'essai

Pour ce concept d'essai, les types de matériel suivants sont nécessaires:

- cellule TEM avec résistance de terminaison adaptée;
- amplificateur de puissance à ondes non modulées, analyseur de réseau ou analyseur de spectre capable d'effectuer des mesures simultanément sur deux voies;
- sondes de référence et de réponse;
- système de transmission à fibres optiques;
- unité d'acquisition de données et mémoire de grande capacité;
- unité de traitement de données et capacité de traçage.

Procédure d'essai

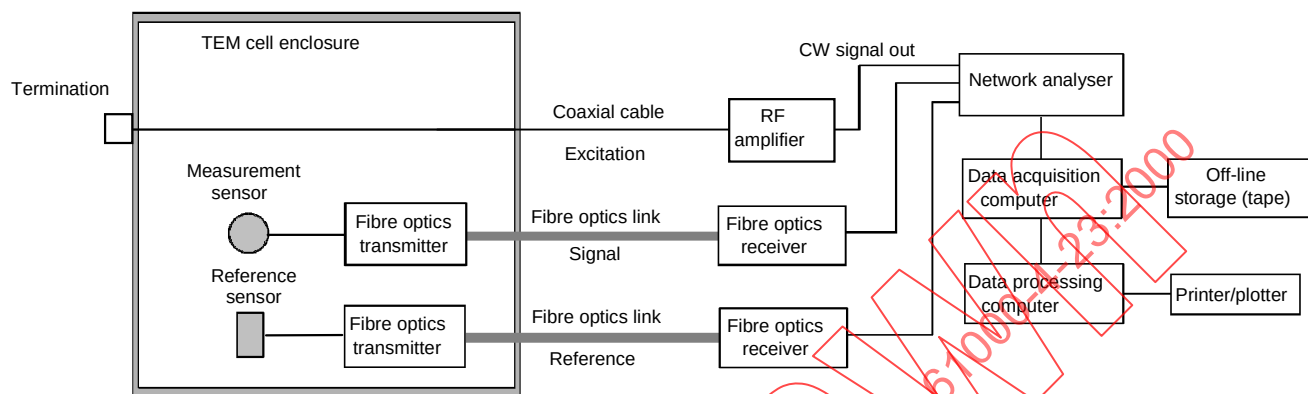
Les essais dans la cellule TEM se déroulent de la même façon que pour les autres essais décrits précédemment: l'analyseur de réseau commande l'amplificateur de puissance et balaye entre une basse fréquence et une haute fréquence déterminée par les limites supérieures de fonctionnement de la cellule TEM. Des mesures des sondes de champ de référence et de la réponse du système interne sont réalisées simultanément par l'analyseur de réseau, et la fonction de transfert entre ces deux grandeurs est développée directement dans l'analyseur de spectre. Si l'on souhaite obtenir une réponse transitoire extrapolée à partir de ces mesures, on utilise alors la procédure d'analyse illustrée à la figure 24. Cependant, si l'on souhaite obtenir l'efficacité de blindage de l'enceinte, ce type d'analyse détaillée n'est pas réalisé: seule la réponse SE est formée à partir de la fonction de transfert, comme le décrit l'équation (2).

5.1.2.4 Cellule TEM à extrémité unique

Pour remplacer la cellule TEM à double extrémité décrite ci-dessus, il est possible d'utiliser la cellule TEM conique comme la cellule présentée à la figure 29. Dans cette chambre d'essai, le conducteur interne est décalé verticalement pour créer un volume d'essai plus large, et il présente une section transversale coaxiale rectangulaire graduellement ouverte, se refermant sur une charge adaptée.

Test set-up

The equipment set-up for testing in the TEM cell is similar to that used for the CW field illumination testing discussed in 5.1.2.1, with the exception that the shielded enclosure surrounding the equipment in the CW case is not needed, because of the shield surrounding the TEM cell. Figure 28 illustrates the equipment connections for this test.



IEC 1734/2000

Figure 28 – Test set-up for field illumination in the TEM cell

Test equipment

For this test concept, the following types of equipment are needed:

- TEM cell with matched termination resistance;
- CW power amplifier, network analyser or spectrum analyser capable of simultaneous measurements on two channels;
- reference and response sensors;
- fibre optics transmission system;
- data acquisition computer and mass storage medium;
- data processing computer and plot capability.

Test procedure

Testing in the TEM cell proceeds in a manner similar to the other tests described previously: the network analyser drives the power amplifier and sweeps from a low frequency to a high frequency which is determined by the upper limits of operation of the TEM cell. Measurements of the reference field sensors and the internal system response are made simultaneously by the network analyser and the transfer function between these two quantities is developed directly in the spectrum analyser. If an extrapolated transient response is desired from these measurements, then the analysis procedure illustrated in figure 24 is used. However, if the shielding effectiveness of the enclosure is desired, such a detailed analysis is not performed: only the SE response is formed from the transfer function, as described by equation (2).

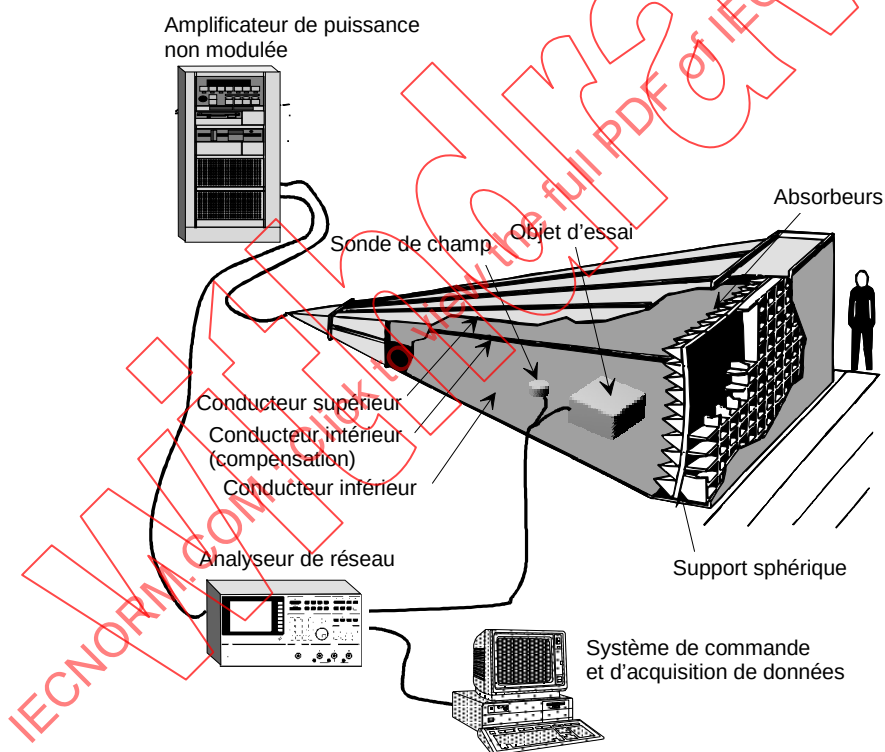
5.1.2.4 Single-ended TEM cell

An alternative to the double-ended TEM cell described above is the tapered TEM cell as shown in figure 29. In this test chamber, the inner conductor is offset vertically so as to create a larger test volume, and it has a gradually flared rectangular coaxial cross-section, terminating in a matched load.

La terminaison finale comprend une combinaison de charge de 50Ω d'élément de circuit basse fréquence et un mur absorbant haute fréquence permettant d'absorber l'onde de propagation incidente comme dans les chambres anéchoïques. Le croisement entre ces deux régimes dépend de la taille de la cellule et de la longueur de l'absorbeur. L'adaptation d'impédance à large bande fournie par la terminaison agit pour supprimer les modes supérieurs. Le matériau absorbant réduit de façon considérable la valeur Q de la cavité de chambre, réduisant ainsi les effets de résonance des modes de cavité. Il convient que la variabilité de champ à l'intérieur de la chambre vide soit inférieure à ± 4 dB, pour des fréquences variant du c.c. à 1 GHz.

Les cellules ont été appelées cellules «GTEM» pour souligner leur capacité en gigahertz. Les cellules ont été construites avec des hauteurs de chambre d'essai variant de 0,5 m à plus de 3 m, en vue d'être utilisées pour des essais de carte imprimée avec un matériel de la taille d'un boîtier. Des cellules plus grandes, capables de servir à des essais complets sur un casier ou un véhicule, sont à l'étude.

Les essais, au niveau de ces cellules TEM modifiées, sont identiques à ceux décrits au paragraphe précédent, mais la gamme de fréquences supérieures est plus élevée. Par conséquent, un matériel similaire est utilisé (mais peut-être avec une largeur de bande plus grande), et l'on utilise la même procédure d'essai que celle présentée en 5.1.2.3. Voir également la CEI 61000-4-20 pour obtenir des informations sur les essais utilisant des cellules TEM.



IEC 1735/2000

Figure 29 – Illustration de la cellule TEM à extrémité unique et matériel associé

The end termination consists of a combination low-frequency circuit element $50\ \Omega$ load, and a high-frequency absorber wall for absorbing the incident propagating wave as in anechoic chambers. The crossover between these two regimes depends on the cell size and the absorber length. The broadband impedance match provided by the termination acts to suppress higher modes. The absorbing material significantly reduces the Q of the chamber cavity, thereby reducing the resonance effects of the cavity modes. Field variability inside the empty chamber should be less than ± 4 dB for frequencies from d.c. to 1 GHz.

The cells have been given the name "GTEM" cells to emphasize their gigahertz capability. Cells have been constructed with test chamber heights from 0,5 m to over 3 m for use in testing printed circuit board up to box-size equipment. Larger cells, capable of complete rack or vehicle testing, are under study.

Testing in these modified TEM cells is identical to that discussed in the previous subclause, with the exception that the upper frequency range is higher. Consequently, similar equipment is used (but perhaps with a larger bandwidth), and the same test procedure as that discussed in 5.1.2.3 is used. See also IEC 61000-4-20 for information on testing with the use of TEM cells.

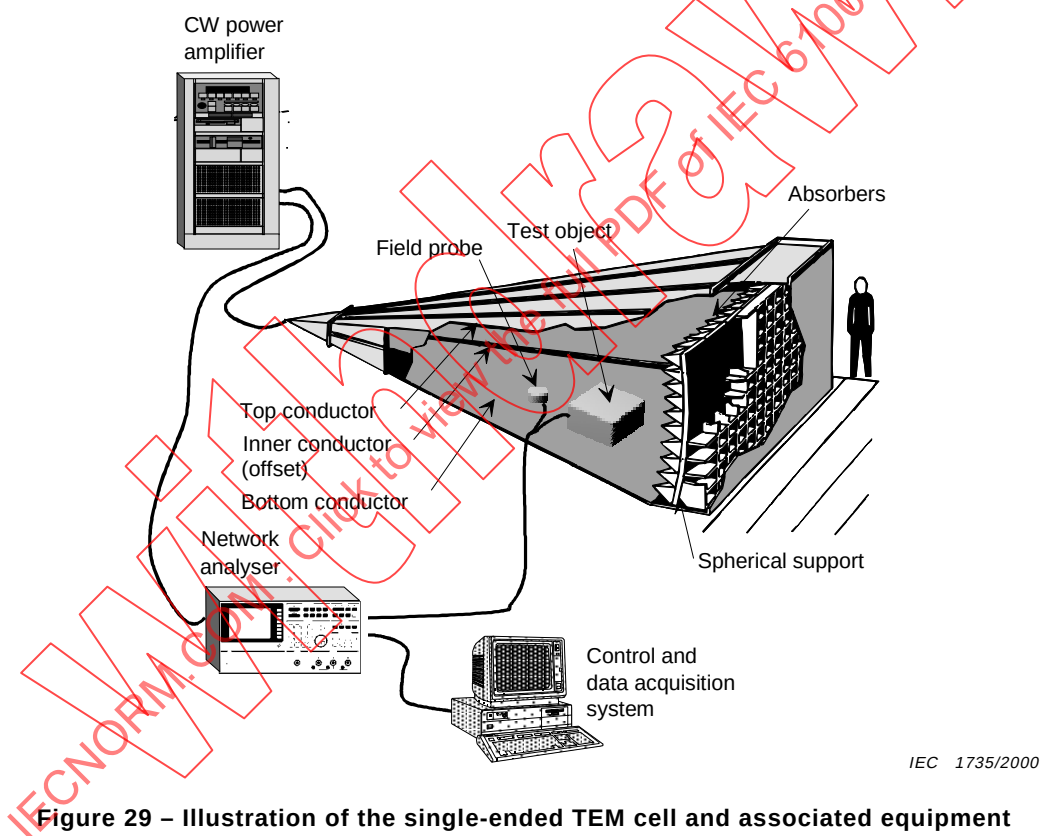


Figure 29 – Illustration of the single-ended TEM cell and associated equipment

5.1.2.5 Essais sur enceintes faiblement blindées

Dans certains cas, une enceinte blindée peut ne pas être considérée comme un blindage satisfaisant. C'est le cas lorsqu'il existe de nombreuses ouvertures dans le blindage ou lorsque le matériau de blindage n'est pas fortement conducteur. Dans ce type de cas, les essais de blindage peuvent être réalisés en illuminant une barrière locale à l'aide d'une petite antenne permettant une illumination de champ EM à proximité de l'élément de pénétration de la barrière. Ces essais sont moins fiables que les essais d'illumination de l'ensemble du système, car les valeurs d'efficacité du blindage dépendent de l'emplacement de la sonde de mesure interne ainsi que de l'emplacement de l'antenne extérieure. Ainsi, une gamme de valeurs SE peut être obtenue pour un système particulier. Par exemple, comme l'illustre l'article 4, des essais d'illumination locale peuvent être appliqués à la mesure du blindage global de l'enceinte (comme à la figure 5), à la mesure localisée du blindage fourni par un treillis ou une protection de panneau conducteur sur les ouvertures (comme à la figure 16), ou aux essais localisés d'autres méthodes de protection POE (comme suggéré à la figure 18).

En raison de la nature localisée de la source d'excitation, cette mesure fournit des informations uniquement sur le blindage de la région où le champ EM d'excitation est le plus fort. Dans le cas de mesures conçues pour tester le blindage global d'une grande installation, les essais sont réalisés au niveau de plusieurs emplacements de source/récepteur différents, ce qui permet de caractériser de façon adaptée le blindage dans son ensemble. Pour des mesures POE localisées, cependant, les essais sont réalisés à proximité du point de pénétration.

Comme indiqué à l'article 4, le comportement du blindage d'une enceinte à faible fréquence est différent pour les champs E et H . Les champs E étant relativement faciles à blinder pour ces fréquences, seuls des essais d'efficacité de champ magnétique sont nécessaires. A mesure que la fréquence augmente, l'efficacité de blindage devient identique pour E et H , et elle est équivalente à l'efficacité du blindage d'onde plane. Cette grandeur est également mesurée par la méthode d'essai.

La barrière électromagnétique devant rester intacte durant la conduite des mesures d'efficacité de blindage et l'utilisation d'un matériel électriquement bruyant devant être restreinte, l'activité de construction ou des opérations inhabituelles (modification d'installation, maintenance) peuvent être affectées. Les niveaux des signaux rayonnés sont faibles et ne présentent aucun danger pour le matériel, mais des réglages de fréquence peuvent être nécessaires pour éviter les auto-interférences et les interférences des installations voisines. Les précautions de sécurité électrique normales s'appliquent durant cet essai.

Montage d'essai

Pour la réalisation de ces essais d'efficacité de blindage de champ magnétique basse fréquence ou d'onde plane au niveau de l'enceinte, on utilise les montages d'essai de base illustrés à la figure 30 et à la figure 31²⁾. Les mesures des réponses de l'antenne de réception sont réalisées avec ou sans le blindage; le rapport entre ces réponses fournit une indication sur l'efficacité du blindage de la barrière locale selon la formule suivante:

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{V_c}{V_m} \right| \quad \text{dB} \quad (11)$$

où

V_c est la réponse du récepteur mesurée dans des conditions d'étalonnage (sans la barrière);

V_m est la réponse mesurée avec la barrière.

NOTE Il est recommandé d'appliquer cette procédure aux enceintes suffisamment grandes pour abriter le matériel d'essai.

²⁾ Des informations supplémentaires figurent dans la MIL-STD 188-125-1, 17 July 1998.

5.1.2.5 Testing of poorly shielded enclosures

In some instances, a shielded enclosure cannot be viewed as being a "good" shield. Such is the case if there are many openings in the shield or if the shield material is not highly conducting. In these instances, the testing of the shielding can be accomplished by performing a local barrier illumination using a small antenna that provides EM field illumination in the vicinity of the barrier penetration. Such tests are less reliable than are the full system illumination tests, because the shielding effectiveness values depend on the location of the internal measurement sensor, as well as the location of the external antenna. Thus, a range of *SE* values can be obtained for any particular system. For example, as illustrated in clause 4, local illumination tests can be applied to the measurement of the overall shielding of the enclosure (as in figure 5), to the localized measurement of the shielding provided by wire mesh or conducting panel protection over apertures (as in figure 16), or to the localized testing of other POE protection methods (as suggested in figure 18).

Because of the localized nature of the excitation source, this measurement provides information only about the shielding in the region where the excitation EM field is strongest. For measurements designed to test the global shielding for a large facility, the testing is performed at many different source/receiver locations to adequately characterize the complete shield. For localized POE measurements, however, the testing is performed in the vicinity of the penetration point.

As noted in clause 4, the shielding behaviour of an enclosure at low frequencies is different for the *E*- and *H*-fields. Because the *E*-fields are relatively easy to shield for these frequencies, only tests of the magnetic field shielding effectiveness are required. As the frequency increases, the *E* and *H* shielding effectiveness become identical, and they are equivalent to the plane-wave shielding effectiveness. This quantity is also measured by the test method.

Since the electromagnetic barrier has to remain intact during the conduct of the shielding effectiveness measurements, and since the use of electrically noisy equipment has to be restricted, construction activity or unusual operations (facility modification, maintenance) may be affected. Radiated signal levels are low and present no hazard to equipment, but frequency adjustments may be required to avoid self-interference or interference with nearby facilities. Normal electrical safety precautions apply during this test.

Test set-up

In conducting these low-frequency magnetic field or plane-wave shielding effectiveness tests of the enclosure, the basic test set-ups illustrated in figure 30 and figure 31 shall be used ²⁾. Measurements of the receiving antenna responses, with and without the shield present, are made, and the ratio of these responses provides an indication of the shielding effectiveness of the local barrier as

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{V_c}{V_m} \right| \quad \text{dB} \quad (11)$$

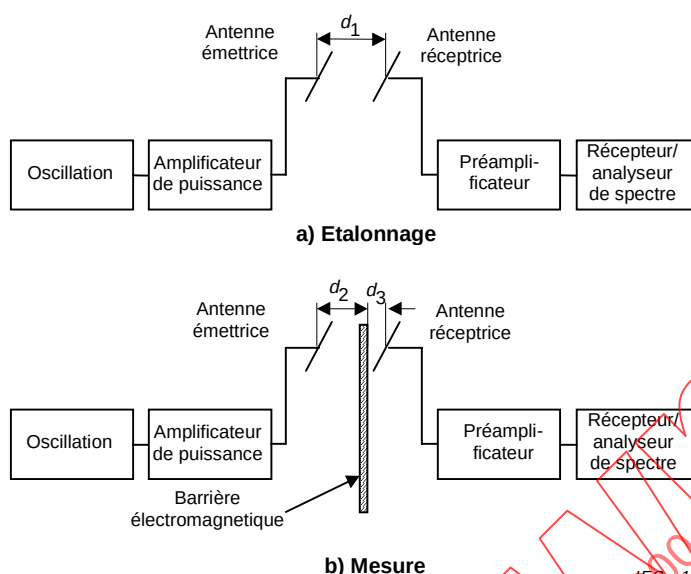
where

V_c is the measured receiver response under calibration conditions (without the barrier);

V_m is the measured response with the barrier in place.

NOTE This procedure should be applied to shielded enclosures large enough to accommodate the test equipment inside the enclosure.

²⁾ Additional information is found in MIL-STD 188-125-1, 17 July 1998.



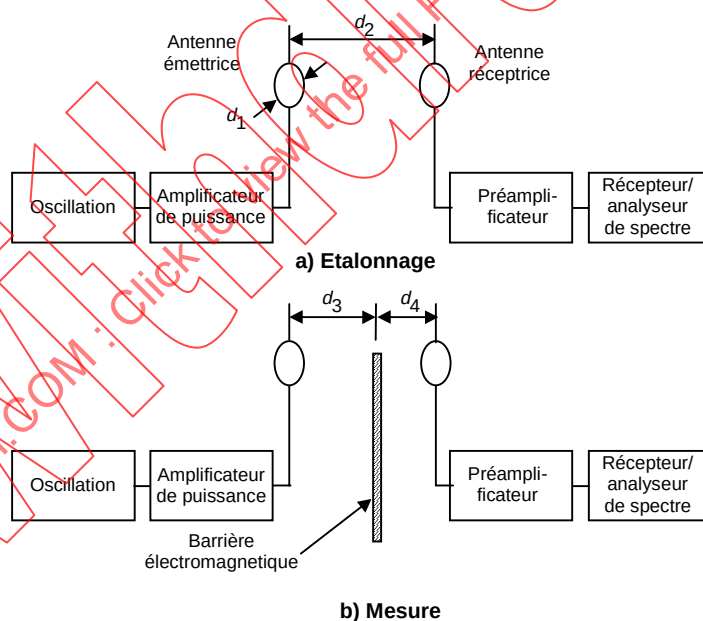
Dimensions

d_1 aussi grande que possible, en respectant les contraintes de la gamme dynamique, 5 m au minimum

d_2 d_1 à 30 cm

d_3 5 cm à 60 cm pour le balayage de l'antenne de réception

Figure 30 – Montage d'essai pour les mesures d'efficacité de blindage d'onde plane



Dimensions

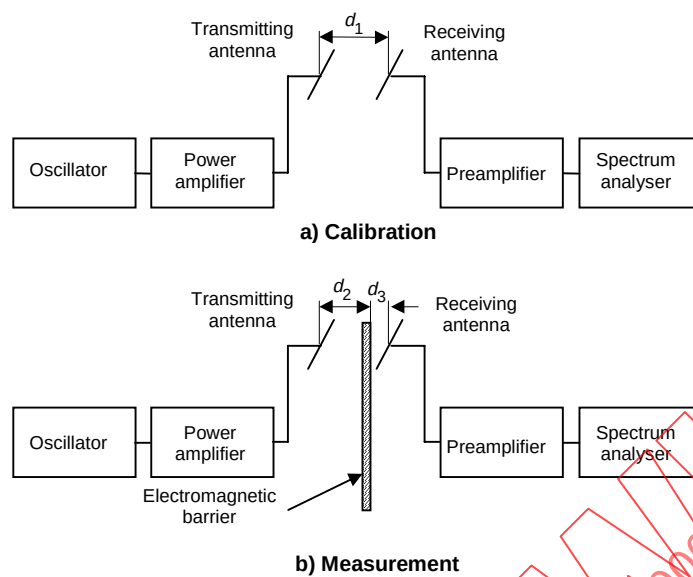
d_1 diamètre de boucle

d_2 aussi grande que possible, en respectant les contraintes de la gamme dynamique, $2 \times d_1$ ou 1,255 m au moins, en choisissant la plus grande valeur

d_3 d_2 à 30 cm

d_4 5 cm à 60 cm pour le balayage de l'antenne de réception

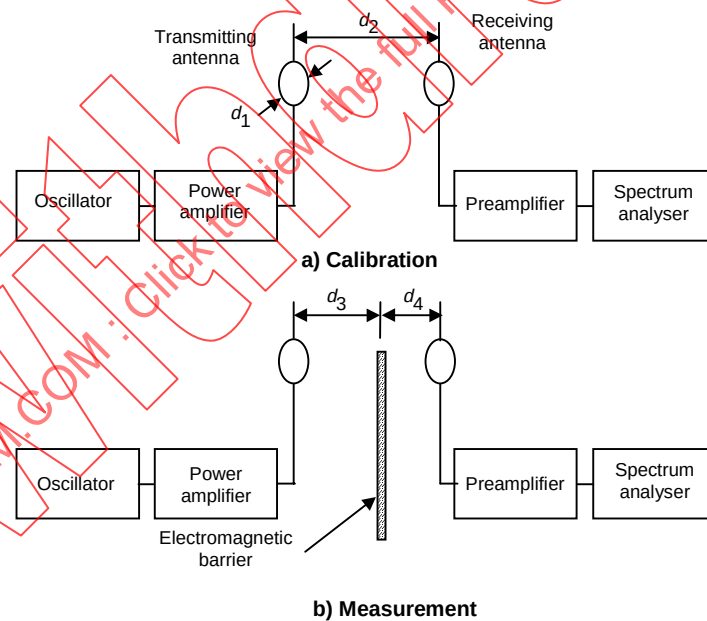
Figure 31 – Montage d'essai pour les mesures d'efficacité de blindage de champ H



Dimensions

 d_1 as large as possible, within dynamic range constraints and at least 5 m d_2 d_1 to 30 cm d_3 5 cm to 60 cm for sweeping the receiving antenna

IEC 1736/2000

Figure 30 – Test set-up for the plane-wave shielding effectiveness measurements

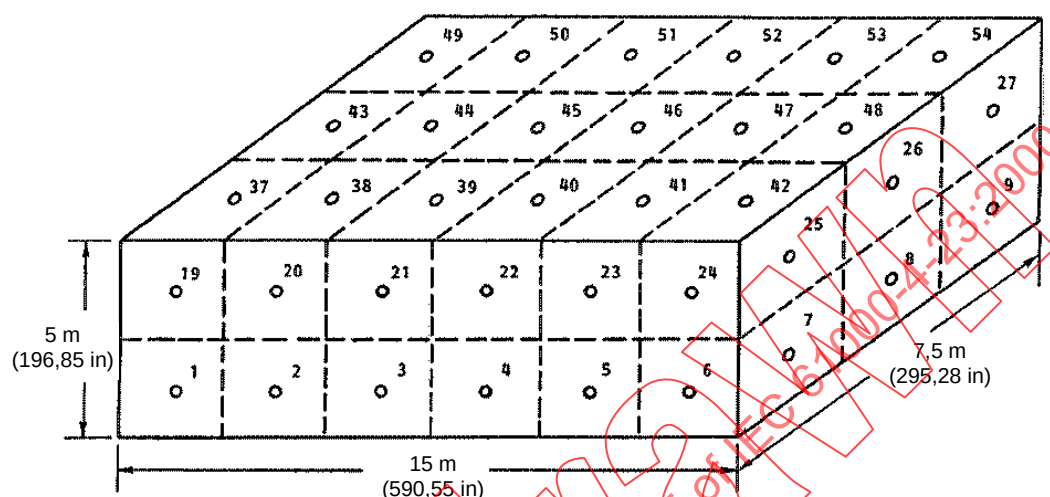
Dimensions

 d_1 loop diameter d_2 as large as possible, within dynamic range constraints and at least $2 \times d_1$ or 1,255 m, whichever is larger d_3 d_2 to 30 cm d_4 5 cm to 60 cm for sweeping the receiving antenna

IEC 1737/2000

Figure 31 – Test set-up for the *H*-field shielding effectiveness measurements

Les antennes localisées sont utilisées pour illuminer diverses parties de l'enceinte de blindage. Pour les mesures du blindage d'onde plane et de champ H , l'ensemble de la surface (y compris le sol, lorsque les deux côtés du blindage sont accessibles) de la barrière électromagnétique doit être divisé en plans numérotés ne dépassant pas $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$, selon l'illustration de la figure 32. Les cercles de cette figure au centre de chaque zone indiquent les divers emplacements d'antenne d'émission pour ces mesures.



IEC 1738/2000

Figure 32 – Exemple d'emplacements d'antenne pour essais d'antenne localisée sur une enceinte ou une installation blindées hypothétiques

Matériel d'essai

Le matériel d'essai requis pour les mesures d'efficacité de blindage comprend les éléments suivants:

- oscillateurs de signaux RF;
- amplificateur(s) de puissance RF avec sortie de puissance requise pour la gamme dynamique;
- préamplificateur(s);
- récepteurs/ analyseur(s) de spectre;
- antenne(s);
- divers câbles et atténuateurs – selon les prescriptions.

Procédures d'essai

Mesures d'efficacité de blindage d'onde plane

Pour chaque zone d'essai d'onde plane définie à la figure 32, six mesures d'efficacité de blindage doivent être réalisées en balayant la position de l'antenne du récepteur. Ces mesures doivent être réalisées à trois fréquences distinctes dans la bande IEMN-HA, pour chacune des deux polarisations d'antenne d'émission, comme suit.

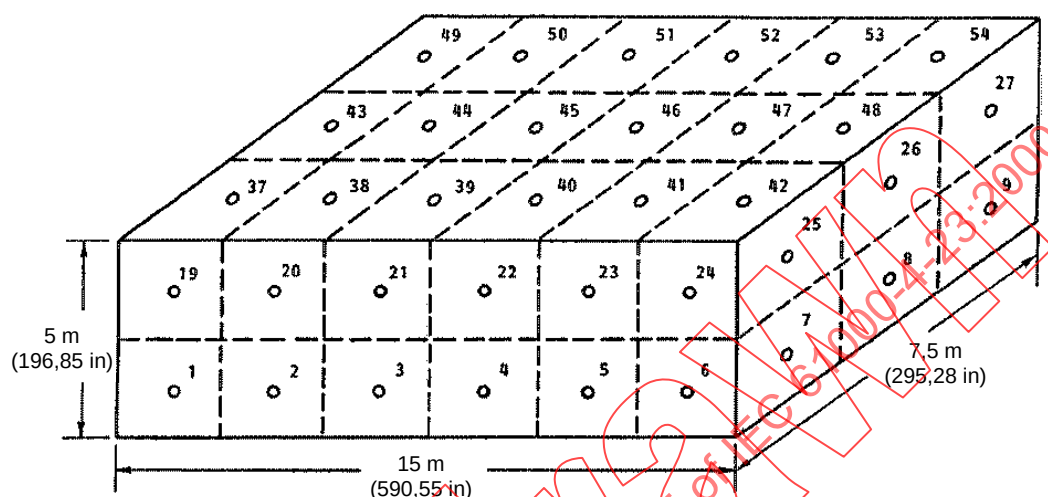
a) Fréquences

Trois fréquences dans la gamme de 50 MHz à 200 MHz, espacées de façon approximativement égale dans cette gamme de fréquences.

b) Polarisation d'antenne d'émission

Dipôle (ou ouverture d'antenne) parallèle à la surface de la zone d'essai selon deux orientations, à 90° l'une de l'autre et parallèle aux principales soudures du blindage.

The localized antennas are used to illuminate various portions of the shielding enclosure. For both the plane-wave and *H*-field shielding measurements, the entire surface (including the floor when both sides of the shield are accessible) of the electromagnetic barrier shall be divided into numbered plane areas not greater than 2,5 m × 2,5 m, as illustrated by the example in figure 32. The circles in this figure in the centre of each area indicate the various transmitting antenna locations for these measurements.



IEC 1738/2000

Figure 32 – Example of antenna locations for the localized antenna tests for a hypothetical shielded enclosure or facility

Test equipment

The test equipment required for shielding effectiveness measurements includes the following:

- RF signal oscillators;
- RF power amplifier(s) with a power output as required for dynamic range;
- preamplifier(s);
- receivers/ spectrum analyser(s);
- antenna(s);
- miscellaneous cables and attenuators – as required.

Test procedures

Plane-wave shielding effectiveness measurements

For each plane-wave test area defined in figure 32, six shielding effectiveness measurements shall be made by sweeping the receiver antenna position. These measurements shall be made at three distinct frequencies in the HEMP band, for each of two transmitting antenna polarizations, as follows.

a) *Frequencies*

Three frequencies in the range of 50 MHz to 200 MHz, approximately equally spaced within this frequency range.

b) *Transmitting antenna polarizations*

Dipole (or antenna aperture) parallel to the test area surface in two orientations, at 90° to each other and parallel to the principal weld seams in the shield.

L'étalonnage d'onde plane pour chaque fréquence et polarisation d'antenne d'émission doit être réalisé conformément à la figure 30a. Les antennes dipôles d'émission et de réception doivent être orientées parallèlement l'une par rapport à l'autre (ou les plans d'antennes à ouverture rayonnante parallèles l'un par rapport à l'autre). La distance entre les antennes doit être aussi grande que possible, en respectant les contraintes de la gamme dynamique, mais elle doit être au moins égale à 5 m. La position de l'antenne de réception doit être modifiée de ± 30 cm par rapport à son emplacement nominal afin de s'assurer qu'elle n'est pas située au niveau du point minimum du diagramme de rayonnement. Le matériel d'essai doit être choisi pour fournir une gamme dynamique supérieure d'au moins 20 dB à la prescription d'efficacité de blindage à la fréquence d'essai. Durant l'étalonnage, aucun matériel ou autre réflecteur électromagnétique (à l'exception du sol) ne doit être à une distance inférieure à trois fois la séparation de l'antenne. Les antennes doivent être situées au moins à 2 m au-dessus du sol. L'intensité du signal reçu pour chaque fréquence et polarisation de l'antenne d'émission doit être enregistrée en tant que signal d'étalonnage (V_c) pour cette configuration.

Après l'étalonnage, les mesures d'efficacité de blindage d'onde plane pour chaque zone d'essai et à chaque fréquence et polarisation d'antenne d'émission requises doivent être réalisées comme indiqué à la figure 30b. Un matériel, des antennes, un câble et des réglages identiques (à l'exception des réglages d'atténuateurs) doivent être utilisés pour l'étalonnage et les mesures.

L'antenne d'émission doit normalement être placée à l'extérieur de la barrière électromagnétique et doit être centrée sur la zone d'essai. L'axe du dipôle d'émission (ou le plan, dans le cas d'une antenne à ouverture rayonnante) doit être parallèle à la surface de la zone d'essai et parallèle à l'une des deux principales directions de soudure. La distance séparant l'antenne d'émission de la surface de la zone d'essai doit être inférieure de 30 cm à la séparation pour laquelle est effectué l'étalonnage.

Pour réaliser les mesures de balayage, l'antenne réceptrice doit être balayée sur toute la zone d'essai selon des distances d'environ 5 cm à 60 cm par rapport à la surface de la zone d'essai et doit pivoter jusqu'à obtenir un signal reçu maximal. L'intensité maximale du signal reçu doit être enregistrée comme signal à balayage de fréquence V_m (en V/m) pour cette zone d'essai, cette fréquence et cette polarisation d'antenne d'émission³⁾. Les valeurs d'efficacité de blindage sont calculées en utilisant l'équation (11).

Mesures d'efficacité de blindage de champ magnétique

Pour chaque zone d'essai de champ magnétique de 2,5 m × 2,5 m présentée à la figure 32, six mesures d'efficacité de blindage doivent être réalisées à trois fréquences pour chacune des deux polarisations d'antenne d'émission, comme suit.

a) Fréquences

Une fréquence de la gamme 15 kHz à 30 kHz, une fréquence de la gamme 300 kHz à 500 kHz et une fréquence de la gamme 1 MHz à 20 MHz.

b) Polarisation d'antenne

Plan de l'antenne cadre perpendiculaire à la surface de la zone d'essai selon deux orientations, à 90° l'une de l'autre et parallèle aux principales soudures dans le blindage.

³⁾ Lorsque la zone d'essai comprend une plaque collectrice d'ouverture ou de conduction nécessitant un volume de protection spécifique dans la barrière électromagnétique, il convient également que l'antenne de réception soit balayée sur toute la surface extérieure de la barrière de protection spéciale, à des distances d'environ 5 cm à 60 cm de la surface de la barrière, et qu'elle soit pivotée. Les critères d'acceptation/de rejet pour ces indications sont identiques aux critères d'acceptation/de rejet appliqués à d'autres mesures d'efficacité de blindage.

The plane-wave calibration for each frequency and transmitting antenna polarization shall be performed in accordance with figure 30a. The transmitting and receiving dipole antennas shall be oriented parallel to each other (or aperture antenna planes parallel to each other). The distance between antennas shall be as large as possible, within dynamic range constraints, but shall be at least 5 m. The receiving antenna position shall be varied by ± 30 cm from its nominal location to ensure that it is not located at a minimum of the radiation pattern. Test equipment shall be chosen to provide a dynamic range at least 20 dB in excess of the shielding effectiveness requirement at the test frequency. During calibration, no equipment or other electromagnetic reflector (except ground) shall be closer than three times the antenna separation. The antennas shall be at least 2 m above ground. The received signal strength for each frequency and transmitting antenna polarization shall be recorded as the calibration signal (V_C) for that configuration.

After the calibration is completed, the plane-wave shielding effectiveness measurements for each test area, and at each required frequency and transmitting antenna polarization, shall be performed as shown in figure 30b. Identical equipment, antennas, cable and equipment settings (except attenuator settings) shall be used in the calibration and measurement sequences.

The transmitting antenna shall normally be placed outside the electromagnetic barrier and centered on the test area. The transmitting dipole axis (or plane in the case of an aperture antenna) shall be parallel to the test area surface and parallel to one of the two principal weld seam directions. The distance from the transmitting antenna to the test area surface shall be 30 cm less than the separation at which calibration was performed.

To perform the swept measurements, the receiving antenna shall be swept over the entire test area at distances from approximately 5 cm to 60 cm from the test area surface and shall be rotated in orientation until a maximum received signal is obtained. The maximum received signal strength shall be recorded as the swept measured signal V_m for that test area, frequency, and transmitting antenna polarization³⁾. Shielding effectiveness values are calculated using equation (11).

Magnetic field shielding effectiveness measurements

For each 2,5 m $\times$ 2,5 m magnetic field test area shown in figure 32, six shielding effectiveness measurements shall be made at three frequencies for each of two transmitting antenna polarizations, as follows:

a) *Frequencies*

One frequency in the range of 15 kHz to 30 kHz, one frequency in the range of 300 kHz to 500 kHz, and one frequency in the range of 1 MHz to 20 MHz.

b) *Antenna polarizations*

Plane of the loop antenna normal to the test area surface in two orientations, at 90° to each other and parallel to the principal weld seams in the shield.

³⁾ When the test area contains an aperture or conductive PoE which requires a special protective volume inside the electromagnetic barrier, the receiving antenna should also be swept over the entire outer surface of the special protective barrier, at distances from approximately 5 cm to 60 cm from the barrier surface, and rotated in orientation. Pass/fail criteria for these readings are the same as the pass/fail criteria for other shielding effectiveness measurements.

Pour ces mesures, l'étalonnage du champ magnétique à chaque fréquence et chaque polarisation d'antenne d'émission doit être réalisé conformément à la figure 31a. Les boucles des antennes d'émission et de réception doivent être dans le même plan. La distance entre les antennes doit être aussi grande que possible, en respectant les contraintes de la gamme dynamique, mais elle doit correspondre au moins à deux diamètres de boucle, et au moins à 1,25 m. La position de l'antenne de réception doit être modifiée de ± 30 cm par rapport à son emplacement nominal afin de s'assurer qu'elle n'est pas située au niveau du point minimum du diagramme de rayonnement. Le matériel d'essai doit être choisi pour fournir une gamme dynamique supérieure d'au moins 20 dB à la prescription d'efficacité de blindage à la fréquence d'essai. Durant l'étalonnage, aucun matériel ou autre réflecteur électromagnétique (à l'exception du sol) ne doit être à une distance inférieure à trois fois la séparation de l'antenne. Les antennes doivent être situées au moins à 2 m au-dessus du sol. L'intensité du signal reçu pour chaque fréquence et polarisation de l'antenne d'émission doit être enregistrée en tant que signal d'étalonnage V_c (en volts par mètre) pour cette configuration.

Après l'étalonnage, les mesures d'efficacité de blindage de champ magnétique pour chaque zone d'essai et à chaque fréquence et polarisation d'antenne d'émission requises doivent être réalisées comme indiqué à la figure 31b. Un matériel, des antennes, un câble et des réglages identiques (à l'exception des réglages d'atténuateurs) doivent être utilisés pour l'étalonnage et les mesures.

L'antenne d'émission doit normalement être placée à l'extérieur de la barrière électromagnétique et doit être centrée sur la zone d'essai. Le plan de l'antenne cadre émettrice doit être perpendiculaire à la surface de la zone d'essai et parallèle à l'une des deux principales directions de soudure. La distance séparant l'antenne d'émission de la surface de la zone d'essai doit être inférieure de 30 cm à la séparation pour laquelle est effectué l'étalonnage.

L'antenne de réception doit normalement être située à l'intérieur de la barrière. Pour réaliser les mesures de balayage, l'antenne réceptrice doit être balayée sur toute la zone d'essai selon des distances d'environ 5 cm à 60 cm par rapport à la surface de la zone d'essai et doit pivoter jusqu'à obtenir un signal reçu maximal. L'intensité maximale du signal reçu doit être enregistrée comme signal à balayage de fréquence V_m (en volts par mètre) pour cette zone d'essai, cette fréquence et cette polarisation d'antenne d'émission.

5.2 Procédures d'essai d'injection de courant

Les essais couverts par la section 5.2 présentent l'excitation d'un dispositif de protection IEMN-HA ou d'un matériau par injection directe de courant (et de charge), par opposition à l'excitation provoquée par un champ électromagnétique. Cela correspond à l'excitation de la topologie du blindage au niveau des points d'observation à l'intérieur de la surface de blindage principale, comme l'indique l'annexe A.

5.2.1 Essais d'injection sur enceintes

Les essais basse fréquence du blindage fourni par une enceinte ou un boîtier par injection de courant sont étudiés en 4.1.3 et sont illustrés conceptuellement à la figure 7. Ce diagramme est repris à la figure 33a, qui montre l'injection du courant en un point du blindage extérieur et l'extraction en un autre point. La tension en circuit ouvert interne est mesurée au niveau de deux câbles de détection connectés à l'intérieur de l'enceinte.

Cet essai n'est pas conçu pour simuler les effets d'un champ IEMN-HA incident agissant sur l'enceinte; il simule plutôt les effets d'un courant induit par l'IEMN-HA sur des câbles longs, conduit sur l'enceinte blindée. Les points d'injection de courant doivent donc correspondre aux points au niveau desquels le courant circule en direction de l'enceinte dans une configuration normale de fonctionnement. Dans certains cas, il peut exister des points de fixation de câble multiples, nécessitant plusieurs simulations d'injection de courant différentes afin de tenir compte des différentes excitations possibles du blindage.

For these measurements, magnetic field calibration at each frequency and transmitting antenna polarization shall be performed in accordance with figure 31a. The loops of the transmitting and receiving antennas shall be in the same plane. The distance between antennas shall be as large as possible, within dynamic range constraints, but shall be at least two loop diameters and at least 1,25 m. The receiving antenna position shall be varied by ± 30 cm from its nominal location to ensure that it is not located at a minimum of the radiation pattern. Test equipment shall be chosen to provide a dynamic range at least 20 dB in excess of the shielding effectiveness requirement at the test frequency. During calibration, no equipment or other electromagnetic reflectors (except ground) shall be closer than three times the antenna separation. The antennas shall be at least 2 m above ground. The received signal strength for each frequency and transmitting antenna polarization shall be recorded as the calibration signal V_c (in volts per metre) for that configuration.

After the calibration is completed, magnetic field shielding effectiveness measurements for each test area and at each required frequency and transmitting antenna polarization, shall be performed as shown in figure 31b. Identical equipment, antennas, cables and equipment settings (except attenuator settings) shall be used in the calibration and measurement sequences.

The transmitting antenna shall normally be placed outside the electromagnetic barrier and centered on the test area. The plane of the transmitting loop antenna shall be normal to the test area surface and parallel to one of the two principal weld seam directions. The distance from the transmitting antenna to the test area surface shall be 30 cm less than the separation at which calibration was performed.

The receiving antenna shall normally be inside the barrier. To perform the swept measurement, the receiving antenna shall be swept over the entire test area at distances from approximately 5 cm to 60 cm from the test area surface and shall be rotated from vertical to horizontal polarization until a maximum received signal is obtained. The maximum received signal strength shall be recorded as the swept measured signal V_m for that test area, frequency, and transmitting antenna polarization.

5.2 Current injection test procedures

Tests in this subclause deal with those that involve the excitation of a HEMP protection device or material by a direct injection of current (and charge), as opposed to the excitation by an electromagnetic field. This corresponds to the excitation of the system shielding topology at observation points inside the principal shielding surface, as discussed in annex A.

5.2.1 Injection testing of enclosures

The low-frequency testing of the shielding provided by an enclosure or box by current injection is discussed in 4.1.3 and is illustrated conceptually in figure 7. This diagram is repeated in figure 33a which shows current being injected at one location on the external shield and extracted at another location. The internal open-circuit voltage is measured across two sense wires connected to the inside of the enclosure.

This test is not designed to simulate the effects of an incident HEMP field acting on the enclosure; rather, it simulates the effects of an HEMP-induced current on long cables being conducted onto the shielding enclosure. Thus, the locations of current injection shall correspond to points at which there would be current flowing onto the enclosure when it is in its normal operating configuration. In some cases, there may be multiple cable attachment points, requiring several different current injection simulations to account for the different possible excitations of the shield.

Montage d'essai

La figure 33b illustre le montage relatif à cet essai. Un analyseur de réseau, commandé par une unité d'acquisition de données, envoie un signal d'excitation de niveau faible en direction d'un amplificateur de puissance. Cet amplificateur, présentant généralement une sortie par câble coaxial, alimente un diviseur de type symétriseur qui injecte du courant sur une connexion à l'extérieur de l'enceinte et supprime le courant au niveau d'un autre point. Ces points d'injection doivent correspondre aux emplacements présentant des connexions électriques dans la configuration normale de fonctionnement du système.

Une tension adéquate est mesurée au niveau d'un câble de détection interne et est renvoyée vers l'analyseur de réseau par une liaison à fibres optiques, de façon à ne pas interrompre le trajet du courant à l'extérieur du système. Avec la mesure de cette tension interne, on obtient une mesure de l'impédance de transfert du blindage Z_t à partir de l'équation (3).

Lors de la réalisation de cet essai, il est important de s'assurer que la fréquence de fonctionnement est suffisamment faible, de façon que $\lambda = c / 2\pi f > L$, L représentant la plus grande dimension de l'enceinte.

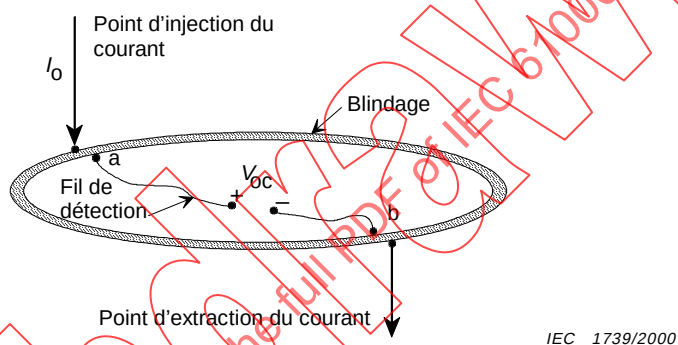


Figure 33a – Concept d'essai

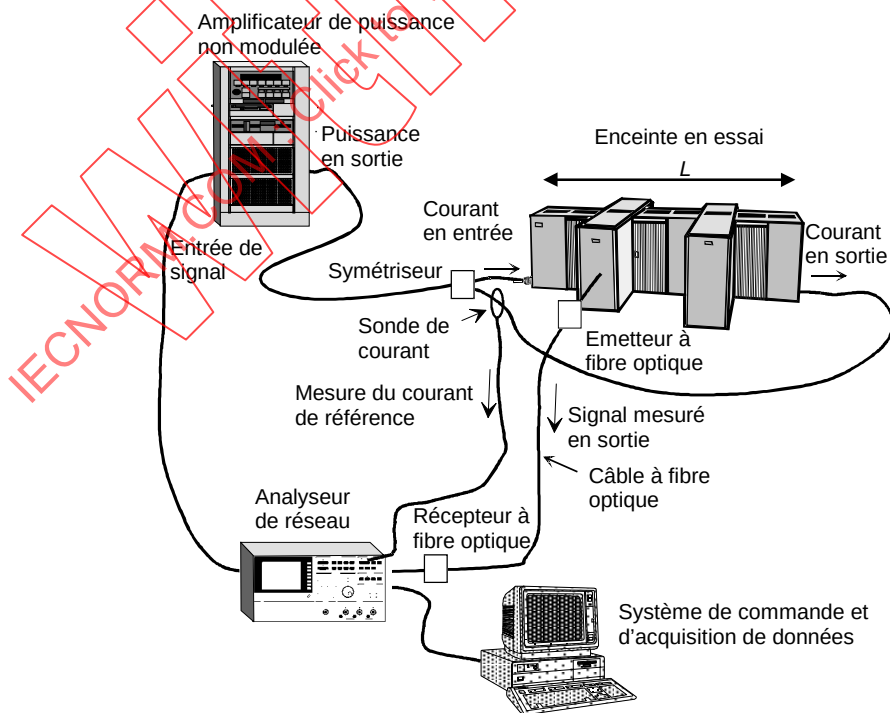


Figure 33b – Configuration du matériel

Figure 33 – Concept d'essai et configuration du matériel pour les essais d'injection de courant dans une enceinte ou un boîtier blindés

Test set-up

Figure 33b illustrates the set-up for this test. A network analyser, controlled by a data acquisition computer, feeds a low-level excitation signal to a power amplifier. This amplifier, typically with a coaxial cable output, feeds a balun-like splitter which injects current onto one connection on the enclosure exterior and removes the current from another point. These injection points shall correspond to locations having electrical connections in the normal operating configuration of the system.

A suitable voltage is measured across an internal sense wire and is conducted back to the network analyser by a fibre optic link, so as not to interrupt the current path on the system exterior. With a measurement of this internal voltage, a measure of the shield transfer impedance Z_t is obtained from equation (3).

In performing this test, it is important to ensure that the frequency of operation is sufficiently low, so that $\lambda = c / 2\pi f > L$, where L is the longest dimension of the enclosure.

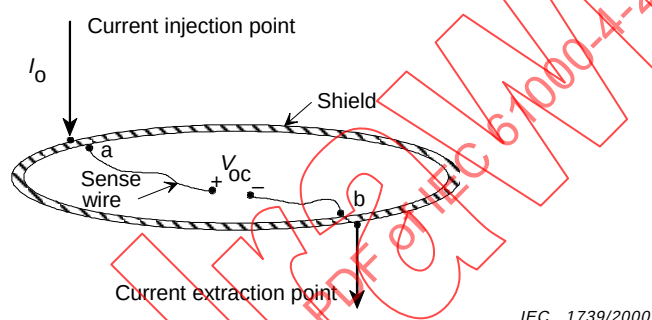


Figure 33a – Test concept

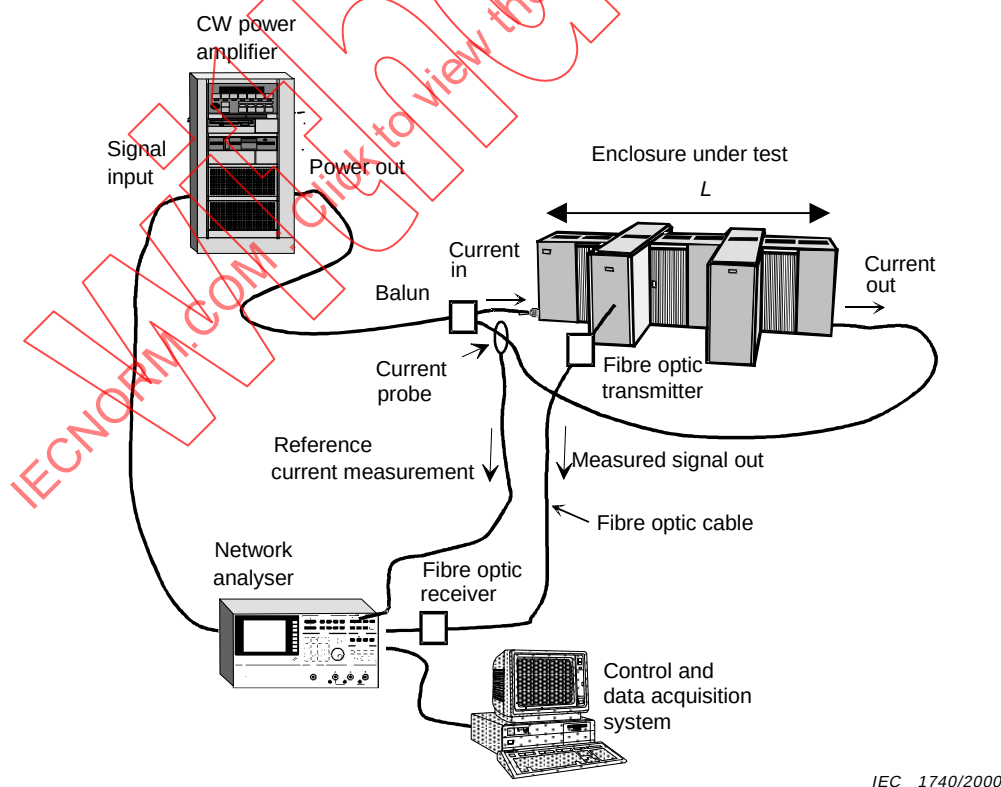


Figure 33b – Equipment configuration

Figure 33 – Test concept and equipment configuration for current injection testing of a shielded enclosure or box

Matériel d'essai

Pour cet essai, les types de matériel suivants sont nécessaires:

- analyseur de réseau ou autre détecteur adapté, capable de mesurer le courant injecté à l'extérieur de l'enceinte et la tension interne;
- amplificateur basse fréquence adapté à l'injection du courant amplifié sur l'enceinte;
- symétriseur d'antenne ou autre dispositif de transition de ligne équilibré coaxial pour l'injection de courant sur le système;
- sondes de tension et de courant;
- unité de transmission à fibres optiques ou autre support de transmission de données adapté au passage de la tension mesurée interne vers l'analyseur de réseau sans perturbation au niveau du trajet de courant extérieur;
- ordinateur de commande et unité d'analyse de données;
- câbles et connecteurs assortis.

Procédure d'essai

Cet essai est réalisé tout d'abord en examinant le système pour déterminer les divers points d'injection de courant qui devraient normalement être excités par un IEMN-HA. La taille (L) de l'enceinte est mesurée puis la fréquence maximale de fonctionnement ($f_{\max}$) est déterminée, de façon que $\lambda_{\min} = c/2\pi f_{\max} > L$. Ensuite, l'analyseur de réseau est balayé de la fréquence la plus faible possible à la fréquence maximale calculée, et l'impédance de transfert complexe égale au rapport V_{oc}/I est évaluée.

Cette mesure est reprise pour différents points collecteurs de tension interne, de façon à obtenir un échantillonnage représentatif des variations de réponse interne. De plus, si d'autres points d'injection de courant extérieur sont possibles, ces mesures doivent être reprises en injectant le courant à fréquence non modulée au niveau de ces points.

Il convient de présenter l'ensemble des réponses mesurées sous la forme de courbes de synthèse montrant les répartitions de réponses en fonction de la fréquence. De plus, l'efficacité de blindage de l'enceinte peut être calculée selon l'équation (4).

5.2.2 Impédance et admittance de transfert des blindages de câble et connecteurs

Les procédures d'essai permettant de déterminer l'impédance et l'admittance de transfert des blindages de câble sont définies à la CEI 60096-1. L'annexe A fournit des informations sur ces techniques de mesure.

5.2.3 Essai du matériau du joint ⁴⁾

5.2.3.1 Mesure de la résistivité

Les essais de résistivité d'un matériau du joint ont été décrits en 4.3.1. Ces mesures peuvent ne pas révéler la dureté de l'élément une fois installé dans un dispositif ou une enceinte, mais ces essais de résistivité en c.c. sont néanmoins utiles pour caractériser le matériau du joint.

Montage d'essai

Le montage d'essai pour cette mesure est illustré à la figure 14. Dans cette figure, le matériau en essai est placé entre deux électrodes, un courant est provoqué par la source de tension d'excitation, et la tension qui en résulte est mesurée au niveau de l'échantillon. Dans le montage d'essai réel, la source d'excitation et le voltmètre sont tous contenus dans une seule unité, le voltmètre à quatre sondes, comme spécifié ci-dessous.

⁴⁾ Les essais du matériau du joint sont décrits dans la norme MIL-G-83528B, 10 Juin 1993.

Test equipment

For this test, the following types of equipment are needed:

- network analyser or other suitable detector capable of measuring the injected current on the enclosure exterior and the internal voltage;
- low-frequency amplifier suitable for injecting the amplified current onto the enclosure;
- balun or other coaxial balanced line transition device for injecting current onto the system;
- voltage and current probes;
- fibre optic transmission unit or other data transmission medium suitable for passing the internal measured voltage back to the network analyser without causing perturbations in the external current path;
- controlling computer and data analysis station;
- assorted cables and connectors.

Test procedure

This test is conducted by first examining the system to determine the various current injection points that would normally be excited by an HEMP event. The size of the enclosure (L) is measured, and the highest frequency of operation ($f_{\max}$) is then determined, so that the minimum wavelength ($\lambda_{\min}$) is $\lambda_{\min} = c/2\pi f_{\max} > L$. Then, the network analyser is swept from the lowest possible frequency to the computed maximum frequency, and the complex valued transfer impedance ratio of V_{oc}/I is evaluated.

This measurement is repeated for different internal voltage collection points, so as to obtain a representative sampling of the variations of the internal responses. In addition, if there are other external current injection points possible, these measurements shall be repeated with the injection of the CW current being made at these points.

The total set of measured responses should be presented in the form of summary curves showing the response distributions as a function of frequency. Furthermore, the shielding effectiveness of the enclosure can be computed using equation (4).

5.2.2 Transfer impedance and admittance of cable shields and connectors

Test procedures for determining the transfer impedance and admittance of cable shields are defined in IEC 60096-1. Annex A provides information on these measurement techniques.

5.2.3 Testing of gasket material ⁴⁾

5.2.3.1 Resistivity measurement

The testing of the resistivity of a gasket material has been described in 4.3.1. Such measurements may not be indicative of how it might actually perform as a hardening element when installed in a facility or enclosure, but, nevertheless, such tests of the d.c. resistivity are useful in characterizing the gasket material.

Test set-up

The test set-up for this measurement is illustrated in figure 14. In this figure, the material under test is located between two electrodes; a current is caused to flow by the excitation voltage source, and the resulting voltage is measured across the sample. In the actual test set-up, the excitation source and the voltmeter are all contained in one unit — the four-probe voltmeter, as specified below.

⁴⁾ Testing of gasketing material is described in MIL-G-83528B, June 10 1993.

Matériel d'essai

Pour cet essai, les types de matériel suivants sont nécessaires.

- Ohmmètre à quatre sondes présentant une gamme de mesures de $10^4 \Omega$ à $10^{-5} \Omega$.
- Electrodes plaquées argent ou or présentant une surface de contact $A = 1,6 \text{ cm}^2$ (correspondant à un diamètre circulaire de 1,43 cm) pour maintenir l'échantillon. Il convient que ces électrodes présentent une marge suffisante pour fixer les électrodes de l'ohmmètre.
- Calibre d'épaisseur pour la mesure des échelons de 0,02 mm.
- Dispositif ou appareil approprié pouvant supporter les électrodes et le spécimen d'essai, ainsi que des moyens adéquats pour appliquer une pression de $(6,89 \times 10^6) \text{ Pa}$ sur l'échantillon.

Procédure d'essai

On doit obtenir des spécimens de joint dont l'épaisseur varie entre 0,1 cm et 0,3 cm et dont la section transversale est au moins identique à celle des électrodes. Avant l'essai, il convient de nettoyer les surfaces du matériau et d'éliminer toute poussière ou corps étranger. Il convient de nettoyer également les électrodes. Avant les essais, il convient de conditionner le spécimen d'essai et le dispositif d'essai pendant 3 h au minimum à une température normalisée de 23°C et une humidité relative de 45 % à 75 %.

Mesurer la zone A des électrodes plaquées argent ou or. Mesurer et enregistrer l'épaisseur L du matériau au niveau du point de contact avec les électrodes en utilisant le calibre d'épaisseur. Le matériau en essai doit présenter une surface de contact suffisante avec l'ensemble de la zone de la surface de l'électrode. Positionner ensuite le matériau entre les électrodes et appliquer une pression de $(6,89 \times 10^6) \text{ Pa} \pm 5 \%$ sur l'échantillon. Tout en maintenant une pression constante, mesurer et enregistrer la résistance R de l'échantillon.

Une fois ces grandeurs mesurées, la résistivité en c.c. du matériau du joint est calculée selon la formule:

$$\rho_{\text{DC}} = R \frac{A}{L} \quad (12)$$

où

ρ_{DC} est la résistivité en c.c. ($\Omega \cdot \text{m}$);

R est la résistance mesurée (Ω);

A est la plus petite section transversale de la partie ou de l'échantillon entre les électrodes de la sonde (m^2),

L est la distance entre les deux électrodes (m).

5.2.3.2 Résistivité du matériau à l'aide de la méthode de la sonde de surface

Une autre méthode d'essai de la résistivité d'un joint peut être utilisée dans les cas où le matériau du joint ne peut pas être découpé. Elle implique de réaliser une mesure en surface de la résistance de l'échantillon.

Montage d'essai

Pour cet essai, on utilise la sonde à deux points présentée à la figure 34. Cette sonde présente une séparation entre les électrodes égale à $L = 2,54 \text{ cm}$; d'autres dimensions types sont indiquées sur la figure. Pour les parties trop réduites pour être mesurées avec cette sonde, on peut utiliser une sonde différente présentant une plus petite séparation entre électrodes, la largeur et l'espacement des électrodes étant réduits ensemble.

Test equipment

For this test, the following types of equipment are needed.

- A four-probe ohmmeter having a measurement range of $10^4 \Omega$ to $10^{-5} \Omega$.
- Silver- or gold-plated electrodes having a contacting area $A = 1,6 \text{ cm}^2$ (corresponding to a circular diameter of 1,43 cm) for holding the sample. These electrodes should have suitable provisions for attaching the ohmmeter electrodes.
- A thickness gauge for measuring in increments of 0,02 mm.
- An appropriate fixture or apparatus having capabilities of supporting the electrodes and test specimen, and suitable means of applying a pressure of $(6,89 \times 10^6) \text{ Pa}$ on the sample.

Test procedure

Gasket specimens with thicknesses ranging from 0,1 cm to 0,3 cm and a cross-sectional area at least the same as the electrodes shall be obtained for testing. Prior to testing, the surfaces of the material should be cleaned and any dirt or foreign matter removed. The electrodes should also be cleaned. Prior to testing, the test specimen and test fixture and electrodes should be conditioned for at least 3 h at a standard temperature of 23 °C and at a relative humidity of 45 % to 75 %.

Measure the area A of the silver- or gold-plated electrodes. Using the thickness gauge measure and record the thickness L of the material at the contact location with the electrodes. The material being tested shall have sufficient area to contact the entire electrode area. Then, position the material between the electrodes and apply a pressure of $(6,89 \times 10^6) \text{ Pa} \pm 5 \%$ across the sample. While maintaining constant pressure, measure and record the sample resistance R .

With these measured quantities, the d.c. resistivity of the gasket material is calculated as

$$\rho_{\text{DC}} = R \frac{A}{L} \quad (12)$$

where

ρ_{DC} is the d.c. resistivity ($\Omega \cdot \text{m}$);

R is the measured resistance (Ω);

A is the smallest cross-sectional area of part or sample between probe electrodes (m^2);

L is the distance between the two electrodes (m).

5.2.3.2 Material resistivity using the surface probe method

An alternative test method for the resistivity of a gasket may be used for cases where the gasket material cannot be cut. This involves making a surface measurement of the resistance of the sample.

Test set-up

For this test, the two-point probe shown in figure 34 is used. This probe has an electrode separation of $L = 2,54 \text{ cm}$, and other typical dimensions are indicated in the figure. For parts too small to be measured with this probe, a different probe with a smaller electrode separation may be used, with the electrode's width and spacing being reduced together.

Il convient que chaque électrode soit en contact avec le joint en un point. Dans le cas d'une partie réelle dont la configuration de section transversale rend difficile ou impossible la mesure à l'aide de cette méthode, il convient d'utiliser la sonde d'essai la plus petite décrite ci-dessus.

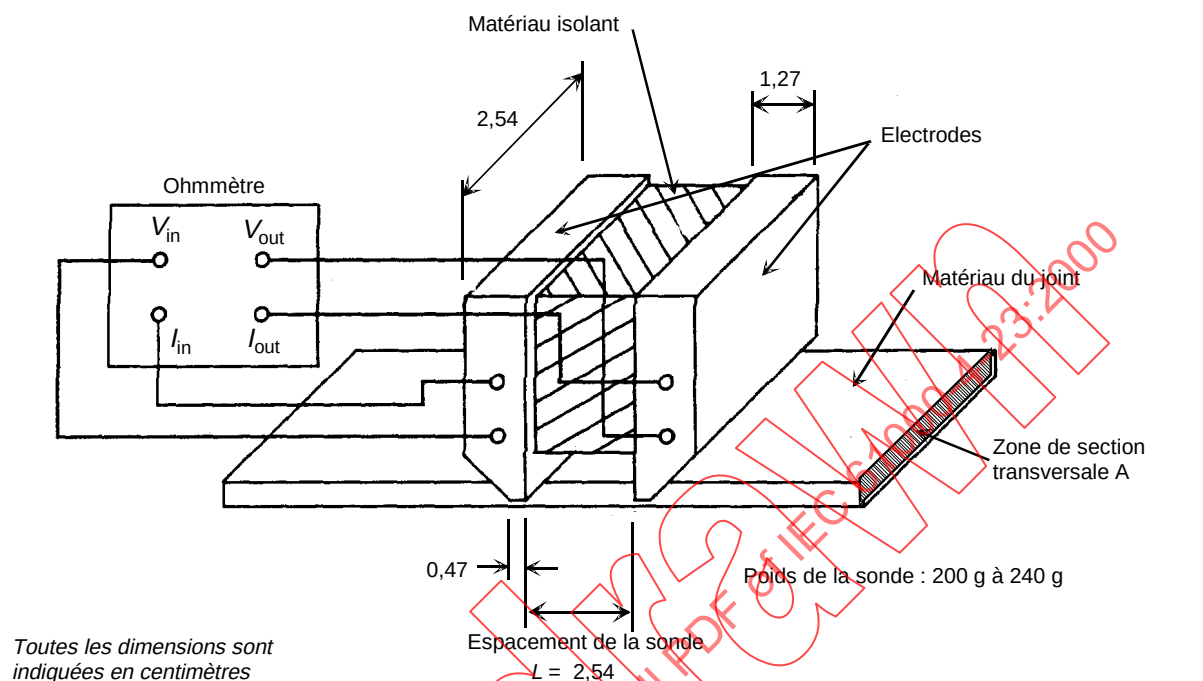


Figure 34 – Sonde de surface pour mesure de la résistivité volumique

Matériel d'essai

Pour cet essai, les types de matériel suivants sont nécessaires:

- Ohmmètre à quatre sondes présentant une sensibilité minimale de 1 mΩ;
- Electrodes plaquées argent ou or, présentant les dimensions indiquées dans la figure, et marges suffisantes pour fixer les électrodes de l'ohmmètre.

Procédure d'essai

La résistivité volumique en c.c. du matériau doit être mesurée à l'aide d'un ohmmètre pouvant mesurer 1 mΩ au minimum. L'échantillon à mesurer doit être placé sur une surface non conductrice. La sonde de mesure doit être placée sur la partie du joint réelle en essai ou, à défaut, sur une partie du matériau d'essai de 1,27 cm de large sur 7,62 cm de long, de 0,14 cm à 0,3 cm d'épaisseur, de façon que le poids de la sonde d'essai soit uniformément réparti sur la partie concernée ou l'échantillon d'essai. La partie doit être en contact sur toute sa largeur avec chaque électrode. Après une période de stabilisation de 30 s, la résistance R sur l'ohmmètre doit être enregistrée. La résistivité volumique en c.c. doit être calculée en appliquant la même équation qu'en 5.2.3.

Each electrode should touch the gasket at one point. In the case a part whose cross-section configuration makes it difficult or impossible to measure using this method, the smaller test probe described above should be used.

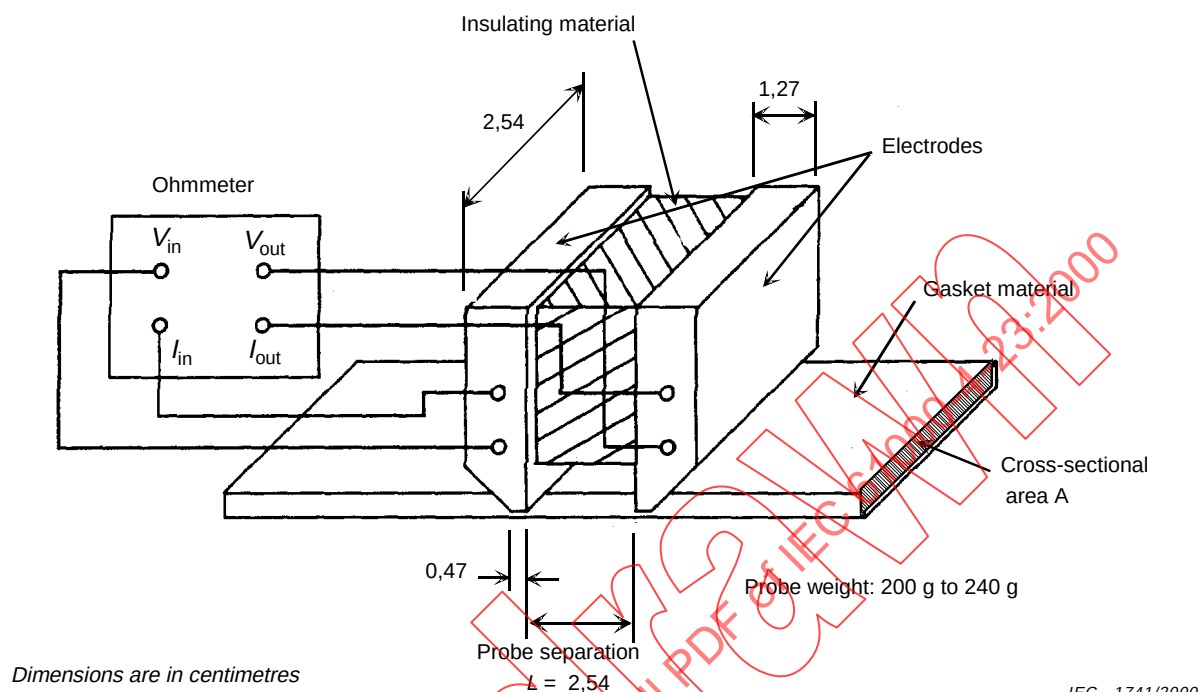


Figure 34 – Surface probe for volume resistivity measurement

Test equipment

For this test, the following types of equipment are needed.

- A four-probe ohmmeter having a minimum sensitivity of 1 m Ω .
- Silver- or gold-plated electrodes having the dimensions shown in the figure, and suitable provisions for attaching the ohmmeter electrodes.

Test procedure

The d.c. volume resistivity of the material shall be measured using an ohmmeter capable of measuring to a minimum of 1 m Ω . The sample to be measured shall be placed on a non-conductive surface. The measurement probe shall be placed on the gasket part being tested, or alternatively, on a piece of sample material that is 1,27 cm wide by 7,62 cm long by 0,14 cm to 0,3 cm thick, in such a manner that the weight of the test probe is uniformly distributed on the part or test sample. The entire width of the part shall be in contact with each electrode. After a 30 s stabilization period, the resistance R on the ohmmeter shall be recorded. The d.c. volume resistivity shall be calculated using the same equation as in 5.2.3.

Annexe A (informative)

Concepts d'essai IEMN-HA pour systèmes électriques

A.1 Introduction

Les essais IEMN-HA pratiqués sur un système électrique sont nécessaires car les modèles mathématiques et numériques ne fournissent pas des résultats suffisamment précis pour donner un niveau de fiabilité élevé dans le cadre de l'évaluation de la capacité de survie d'un système dans un environnement IEMN-HA. Plusieurs facteurs différents influencent la décision de pratiquer un essai IEMN-HA:

- l'importance relative du système et de ses prescriptions de capacité de survie;
- le type de système, sa configuration physique et son emplacement;
- les moyens financiers, temps et personnel disponibles pour les essais;
- la précision souhaitée des résultats.

Avant de déterminer les prescriptions d'essai d'un système, il faut que les facteurs ci-dessus soient soigneusement évalués afin de savoir si l'essai est réellement nécessaire. En effet, les essais peuvent être très coûteux, très longs et peuvent présenter un risque d'endommagement pour le matériel en essai.

A.2 Types d'essais IEMN-HA

Différents types d'essais sont réalisables sur des systèmes afin de déterminer la réponse à une excitation IEMN-HA. Certains essais sont plutôt simples et sans détour, d'autres nécessitent d'importantes installations et des capacités de traitement de données significatives. Les paragraphes suivants décrivent brièvement les principaux types d'essais IEMN-HA.

A.2.1 Essais transitoires au niveau du système

L'essai probablement le plus complet effectué sur un système (l'utilisation d'un environnement nucléaire réel mise à part) consiste à réaliser un essai de niveau dangereux sur le système entier. Ce type d'essai implique l'intégration d'un simulateur EMP à impulsions de niveau dangereux à proximité de l'installation étudiée et la réalisation d'une série de mesures effectuées en modifiant les paramètres tels que les angles d'incidence, la configuration électrique d'un système (c'est-à-dire portes ouvertes ou portes fermées, etc.).

Généralement, dans ce type d'essai, un grand volume de données transitoires est mesuré et sauvegardé en vue d'une analyse postérieure à l'essai. Les résultats de l'analyse pratiquée après l'essai sont généralement exprimés sous la forme d'une probabilité de survie du système dans le cas d'un IEMN-HA, et ils impliquent le concept de normes de forme d'onde.

Le principal avantage de ce type d'essai est que l'ensemble du système est soumis à l'environnement de niveau dangereux souhaité. Par conséquent, les dispositifs de protection non linéaires sont soumis à des contraintes, et la réponse du système intègre les effets de ces éléments. De plus, seront inclus les effets d'autres non linéarités non prévues telles que les contournements au niveau des câbles, qui sont très difficiles à prévoir de façon analytique.

D'autre part, le matériel utilisé dans ces essais est volumineux, coûteux et difficilement transportable. Par conséquent, on utilise généralement un simulateur d'emplacement fixe pour ce type d'essai. Si le système à tester est difficile à déplacer, cet essai n'est pas facile à réaliser. De plus, un grand volume de données est généralement produit dans ce type d'essai, et l'effort d'analyse après l'essai peut être considérable.

Annex A (informative)

HEMP test concepts for electrical systems

A.1 Introduction

HEMP testing of an electrical system is necessary because mathematical and numerical models do not provide sufficiently accurate results to give a high confidence level in the assessment of a system's survivability in an HEMP environment. Many different factors enter into the decision to perform an HEMP test:

- relative importance of the system and its survivability requirements;
- type of system, its physical configuration and location;
- available funds, time and personnel for testing;
- desired accuracy of the results.

Before determining the test requirements for a system, the above factors must be carefully weighed to see if a test is actually needed. This is because testing can be expensive, time consuming, and may pose a risk of damage to the equipment being tested.

A.2 Types of HEMP tests

There are several different types of tests that can be performed on systems to determine the response to an HEMP excitation. Some tests are rather simple and straightforward, while others require large facilities and significant data processing capabilities. The following subclauses briefly describe the major types of HEMP tests.

A.2.1 System-level transient tests

Perhaps the most thorough test of a system (aside from using an actual nuclear environment) is to perform a threat-level test on the entire system. This type of test involves locating a threat-level, pulsed EMP simulator near the facility being investigated, and conducting a series of measurements by changing parameters such as the angles of incidence, the system's electrical configuration (i.e. doors open or shut, etc.).

Typically, in this type of test, a large amount of transient data is measured and saved for analysis after the test is completed. The results of the post-test analysis are usually expressed as a probability of survival of the system in the event of an HEMP event, and involve the concept of waveform norms.

The principal advantage of this type of test is that the entire system is subjected to the desired threat-level environment. As a result, any non-linear protection devices will be stressed and the resulting system response will include the effects of these elements. Furthermore, the effects of other unintended non-linearities such as flashovers in cables, which are very difficult to predict analytically, will be included.

On the other hand, the equipment involved in such tests is bulky, expensive and not easily transportable. Consequently, a fixed site simulator is usually used for this type of testing. If the system to be tested cannot be easily moved, this test is difficult to conduct. Furthermore, there is usually a large amount of data generated by this type of test, and the post-test analysis effort can be considerable.

A.2.2 Essais d'illumination de champ à ondes non modulées

Pour remplacer les essais d'impulsion de niveau dangereux à pleine échelle, il est possible d'appliquer le concept d'essai d'illumination de champ à ondes non modulées. Ce concept d'essai est similaire à celui de l'essai d'impulsion au niveau du système dans la mesure où une structure rayonnante (c'est-à-dire une antenne) est située à proximité du système en essai. Cependant, contrairement à l'essai d'impulsion, l'excitation de l'antenne est harmonique dans le temps (par exemple ondes non modulées) et est balayée ou échelonnée sur une gamme de fréquences, en commençant par une fréquence faible de 10 kHz à 100 kHz jusqu'à une fréquence élevée de 100 MHz à 200 MHz. Certains systèmes d'essai à ondes non modulées plus récents fonctionnent jusqu'à la gamme de fréquences en gigahertz (GHz).

L'objectif de base de l'essai à ondes non modulées consiste à mesurer une fonction de transfert à partir d'une grandeur de champ EM électromagnétique adaptée, à l'extérieur de l'installation et selon une réponse à l'intérieur de l'installation. Cette mesure étant réalisée dans le domaine fréquentiel, la fonction de transfert est une fonction à valeur complexe, caractérisée par son amplitude et sa phase ou, inversement, par ses parties réelles et imaginaires.

Les grandeurs de référence extérieures correspondantes comportent une composante de champ E ou H incident ou global, un courant induit sur un long câble extérieur ou peut-être le courant d'entrée dans l'antenne à ondes non modulées elle-même. Si la réponse mesurée doit être extrapolée à partir d'une réponse IEMN-HA, le choix de la référence extérieure doit être fait de façon à pouvoir établir le lien avec un champ IEMN-HA incident. Les grandeurs de réponse interne peuvent inclure les champs E et H à l'intérieur de l'installation, les courants sur les câbles intérieurs et les tensions au niveau des bornes du matériel.

Cette forme d'essai présente plusieurs avantages par rapport aux essais d'impulsion à pleine échelle décrits précédemment. Le matériel utilisé est facilement disponible et est largement moins coûteux que le matériel utilisé pour les essais d'impulsion. De plus, l'ensemble du système peut être facilement transporté vers des sites éloignés et peut être rapidement monté. En raison des caractéristiques de bande étroite du processus d'excitation et de mesure, les effets du bruit peuvent être réduits. Généralement, il est plus facile d'obtenir un spectre à ondes non modulées «propre» que d'obtenir une forme d'onde transitoire propre.

Le principal inconvénient des essais à ondes non modulées est, qu'en raison du faible niveau de puissance et du mode de fonctionnement non transitoire, les dispositifs de protection non linéaires dans le système ne sont pas déclenchés. De plus, d'autres non linéarités imprévisibles, telles que le contournement d'isolation de câble, ne sont pas relevées. Par conséquent, cette méthode d'essai fournit uniquement la réponse linéaire (ou de niveau faible) et les systèmes testés de cette manière peuvent sembler plus vulnérables qu'ils ne le sont réellement, les effets non linéaires pouvant ajouter une protection supplémentaire – s'ils fonctionnent.

Cet inconvénient peut ne pas avoir d'importance dans certains cas, de nombreux systèmes utilisant les dispositifs non linéaires avec des filtres électriques. Les essais à ondes non modulées sur ces systèmes fournissent une estimation raisonnable de la réponse dans le cas le plus défavorable – notamment la réponse obtenue si le dispositif non linéaire ne fonctionnait pas correctement. De plus, il existe des méthodes permettant d'effectuer une combinaison analytique des mesures à ondes non modulées de niveau faible, effectuées pour un système présentant des caractéristiques de dispositif non linéaire, afin de permettre le calcul du comportement non linéaire à impulsions du système.

Autre inconvénient de cette approche d'essai: le résultat final mesuré n'est généralement pas le résultat final souhaité. Pour obtenir la réponse IEMN-HA transitoire extrapolée, il faut entreprendre certains traitements de données supplémentaires, ce qui peut provoquer des erreurs au niveau de la réponse transitoire résultante.

A.2.2 CW field illumination tests

An alternative to the full-scale, threat-level pulse testing is to use the CW field illumination test concept. This test concept is similar to that of the system-level pulse-testing concept in that a radiating structure (i.e. an antenna) is located near the system under test. Unlike the pulse test, however, the excitation of the antenna is time harmonic (e.g. CW) and is swept or stepped through a range of frequencies, starting at a low frequency of 10 kHz to 100 kHz and stopping at a high frequency of 100 MHz to 200 MHz. Some newer CW testing systems operate up to the gigahertz (GHz) frequency range.

The basic goal of the CW test is to measure a transfer function from a suitable reference electromagnetic EM field quantity outside the facility to a response inside the facility. As this measurement is conducted in the frequency domain, the transfer function is a complex valued function, characterized by its magnitude and phase or conversely by its real and imaginary parts.

Suitable external reference quantities include a component of the incident or total E - or H -fields, a current induced on a long external cable, or perhaps the input current in the CW antenna itself. In cases when the measured response has to be extrapolated from an HEMP response, the choice of the external reference must be made so that it can be related to an incident HEMP field. Internal response quantities can include E - and H -fields inside the facility, currents on internal cables and voltages at equipment terminals.

This form of testing has several advantages over the full-scale pulse testing described earlier. The equipment used is readily available and is significantly less costly than that required for pulse testing. Furthermore, the entire system can be easily transported to remote sites and quickly erected. Because of the narrowband characteristics of the excitation and measurement process, the effects of noise can be reduced. Typically, it is easier to get a "clean" CW spectrum than to get a clean transient waveform.

The major disadvantage of CW testing is that, because of the low power level and non-transient mode of operation, non-linear protective devices within the system are not triggered. In addition, other unpredictable non-linearities, such as cable insulation flashover, are not noted. Consequently, this test method only provides the linear (or low-level) response and systems tested in this manner may appear to be more vulnerable than they really are, since the non-linear effects can add extra protection – if they operate.

This deficiency may not be serious in some circumstances, as many systems use both non-linear devices together with electrical filters. CW testing on these systems provides a reasonable worst-case estimation of the response – namely, the response that would be obtained if the non-linear device were not to function properly. Moreover, there exist methods to combine analytically the low-level CW measurements of a system with the non-linear device characteristics to permit a calculation of the pulsed, non-linear behaviour of the system.

A second disadvantage of this test approach is that the final measured result is usually not the final desired result. To obtain the extrapolated transient HEMP response, some additional data processing must be undertaken, and this can give rise to errors in the resulting transient response.

A.2.3 Essai d'injection de courant

Les deux essais précédents sont appliqués à l'ensemble du système. Un autre concept d'essai consiste à exciter uniquement certaines parties du système. Pour ce faire, on peut identifier des conducteurs électriques importants pénétrant dans une installation et injecter des courants à impulsion ou à ondes non modulées sur les câbles. Les courants injectés se redistribuent ensuite dans l'installation et fournissent une indication de la réponse du système dans des conditions d'excitation de champ extérieur.

Généralement, pour ce type d'essai, une analyse préalable doit être réalisée pour identifier les trajets de courant conducteurs importants pénétrant dans l'installation ou le système considéré. Ils peuvent inclure des lignes d'alimentation, des câbles de communication ou des conducteurs mécaniques. Pour chacun de ces conducteurs, une analyse du couplage de champ EM doit être réalisée pour estimer l'amplitude et la forme d'onde de la réponse IEMN-HA. Ensuite, une source d'injection de courant présentant des caractéristiques transitoires (ou spectrales) correctes est appliquée à chacun des conducteurs sélectionnés et les réponses internes sont mesurées.

L'avantage de ce type d'essai est que le matériel d'injection d'impulsion est généralement plus petit et moins coûteux que le simulateur de grandeur réelle et le matériel associé. De plus, des courants de niveau dangereux sont plus faciles à induire par des méthodes d'injection d'impulsion que par une illumination de champ EM. Réalisé en mode pulsé, ce type d'essai fournit également la possibilité d'exciter des dispositifs non linéaires situés le long des trajets conducteurs excités. Ainsi, un essai d'injection de courant pulsé et un essai d'illumination de champ à ondes non modulées peuvent se compléter.

Ce type d'essai est fondamentalement incomplet, les éventuels effets synergiques d'une excitation simultanée de l'ensemble du système n'étant pas pris en compte. Il existe donc toujours une erreur inconnue dans cette technique de simulation. De plus, l'établissement de la relation entre les niveaux de courant injecté sur les conducteurs extérieurs et le champ IEMN-HA incident est souvent réalisé par analyse. Cette étape peut introduire des incertitudes dans les résultats.

A.2.4 Essai d'illumination partielle

Les essais d'illumination partielle sont équivalents aux essais d'injection d'impulsion, mais on considère que l'excitation du système provient d'une excitation de champ EM partielle du système et non d'une injection de courant sur l'un des conducteurs du système. Cette approche d'essai est parfois désignée comme le concept PARTES.

Cet essai est réalisé en utilisant de petites antennes à dipôles électriques ou magnétiques appelées «excitateurs», à divers emplacements au niveau de la surface extérieure du système en essai. Localement, ces excitateurs produisent une excitation de champ EM du système et une réponse interne correspondante peut être mesurée. On peut utiliser les essais d'ondes non modulées ou d'impulsion selon ce concept. En étudiant un grand nombre d'emplacements d'excitateurs et en combinant de manière analytique les réponses mesurées pour chacun, il est possible de déduire la réponse d'une excitation d'onde plane du système.

Le principal avantage de cette approche est qu'elle permet de réaliser des essais sur des systèmes électriquement importants. Bien que ces systèmes puissent nécessiter de nombreuses mesures lors d'un changement d'implantation de l'excitateur, cette méthode permet ces essais.

Le principal inconvénient de ces essais est qu'il est nécessaire d'effectuer un travail analytique considérable pour combiner correctement les fichiers de données mesurées pour obtenir le résultat final souhaité. En outre, on peut toujours s'interroger sur les meilleurs emplacements pour les sources d'excitateur. Enfin, la question du fonctionnement d'un dispositif non linéaire n'est pas complètement traitée dans ce type d'essai.

A.2.3 Current injection testing

The two previous tests are applied to the entire system. An alternate test concept is to excite only parts of the system. One way of doing this is to identify important electrical conductors entering a facility and inject pulse or CW currents onto the cables. The injected currents will then re-distribute themselves within the facility and provide an indication of the system response under external field excitation conditions.

Typically for this type of test, a pre-test analysis must be performed in order to identify the important conductive current paths into the facility or system being considered. These might include power lines, communication cables or mechanical conductors. For each of these conductors, an analysis of the external EM-field coupling must be performed to estimate the amplitude and waveshape of the HEMP response. A current injection source having the proper transient (or spectral) characteristics is then applied to each of the selected conductors and the internal responses are measured.

The advantage of this type of test is that pulse injection equipment is typically smaller and less expensive than the full-scale simulator and associated equipment. Furthermore, threat-level currents are easier to induce by pulse injection methods than by an EM-field illumination. When operated in a pulsed mode, this type of testing also provides the possibility of exciting non-linear devices located along the conducting paths being excited. Thus, a pulsed current injection test and a CW field illumination test can complement each other.

This type of test is fundamentally incomplete, as the possible synergistic effects of simultaneous excitation of the whole system are not taken into account. Thus, there is always some unknown error in this simulation technique. Furthermore, a key feature of this type of test is that the linking of the injected current levels on the external conductors to the incident HEMP field is often done by analysis. This step can introduce uncertainties in the results.

A.2.4 Partial illumination testing

Partial illumination testing is the counterpart to pulse injection testing, except that the system excitation is viewed as arising from a partial EM-field excitation of the system instead of a current injection on one of the system's conductors. This testing approach is sometimes denoted as the piece-wise application of radiation through an EMP simulator (PARTES) concept.

This test is accomplished by using small electric or magnetic dipole antennas referred to as "drivers" at various locations on the exterior surface of the system being tested. Locally, these drivers produce an EM field excitation of the system and a suitable internal response can be measured. Either CW or pulse testing is possible using this concept. By considering a suitably large number of driver locations and by analytically combining the measured responses for each, the response of a plane-wave excitation of the system can be inferred.

The main advantage of this approach is that electrically large systems can be tested. Although such systems might require many measurements as the driver location is changed, the method can allow for such testing.

The principal disadvantage of this testing is that considerable analytical work must be done to correctly combine the measured data files to obtain the final desired result. In addition, there is always the open question of deciding upon the best locations of the driver sources. Finally, the question of non-linear device operation is not addressed completely in this type of test.

A.2.5 Essai de sous-systèmes et composants

Au-delà des essais de système global, des essais sont pratiqués au niveau du sous-système (c'est-à-dire de la «boîte noire») et au niveau du composant. Dans cet essai, une pièce électronique ou peut-être même un composant discret, au sein d'un matériel, est soumis à ces essais pour vérifier sa réponse. La contrainte IEMN-HA au niveau du composant doit ainsi être déterminée, soit par un essai, soit par analyse.

Ce type d'essai est avantageux car les essais de composants sont relativement peu coûteux et sont réalisés rapidement. De plus, en cas de défaillance du composant ou du matériel, des procédures de consolidation peuvent être déterminées en analysant le mode de défaillance du dispositif.

Cependant, le principal inconvénient de ce type d'essai est qu'il est difficile de s'assurer que le composant est soumis à la même contrainte électrique que celle existant dans des conditions d'excitation IEMN-HA. La contrainte IEMN-HA dans un système est difficile à déterminer exactement sans réaliser d'essai au niveau du système. (Si ce type d'essai était réalisé, il ne serait pas nécessaire de réaliser un essai de composant.) Généralement, la contrainte au niveau du composant est déterminée par une analyse, utilisée ensuite pour déterminer l'excitation correcte par impulsion ou ondes non modulées au niveau du composant.

A.2.6 Essai de fumée

L'essai de fumée, également appelé «essai général», est l'essai IEMN-HA le plus simple à réaliser. Il s'agit d'un essai de système transitoire, de niveau dangereux, conçu pour voir comment réagit un système excité par un IEMN-HA. Dans ce concept d'essai, le système est localisé dans le volume de travail d'un simulateur de niveau dangereux et le simulateur est pulsé une ou plusieurs fois. A part la sonde de référence de champ et le matériel d'enregistrement associé, aucun autre élément d'acquisition de données n'est nécessaire. Il s'agit principalement d'un essai d'acceptation/de refus, parfois appelé essai «oui-ou-non».

L'avantage de cet essai est qu'il est rapide à réaliser, qu'il nécessite un personnel et une planification minimaux et, exception faite des coûts fixes du système en essai et de l'installation de simulation, qu'il est relativement peu coûteux.

Il existe plusieurs inconvénients dans ce type d'essai, qu'il est nécessaire de considérer au regard de la simplicité de l'essai. Premièrement, le système risque d'être endommagé de façon permanente par les essais et nécessiter des réparations coûteuses. Deuxièmement, il existe généralement un seul «exemplaire» de système testé. S'il supporte l'essai, il n'y a aucune garantie qu'un autre système du même type ait le même comportement. Enfin, avec ce type d'essai, aucune information n'est fournie concernant la marge de sécurité.

A.3 Définition de l'interface d'essai

La définition de l'interface d'essai dans le système est l'un des aspects-clés des essais. Elle peut être considérée comme l'emplacement où la contrainte IEMN-HA simulée doit être appliquée au système. On reconnaît généralement qu'un système électriquement complexe peut être représenté par une série de surfaces de blindage, ou «barrières EM», pénétrées au niveau de points sélectionnés par l'un des nombreux «mécanismes de pénétration EM», tels que la diffusion, la pénétration d'ouverture ou la pénétration conductrice. La figure A.1 illustre ce type de schéma pour un système électrique générique, présentant des zones de contraintes électriques différentes induites par IEMN-HA (dans les lignes horizontales), ainsi que les divers trajets de couplage et mécanismes de pénétration.

A.2.5 Subsystem and component testing

Besides full-scale system testing, testing also exists at the subsystem (i.e. "black-box") level and at the component level. In this test, a piece of electronic equipment or perhaps even a discrete component within the equipment is tested for its response. In doing this the HEMP stress at the component must be determined, either from a test or by analysis.

This type of test is advantageous because component testing is relatively inexpensive and is rapidly conducted. Furthermore, if the component or equipment fails, hardening procedures can be determined by analysing the mode of failure of the device.

However, the major disadvantage of this type of testing is that it is difficult to ensure that the component is tested with the same electrical stress that would be found under HEMP excitation conditions. The HEMP stress inside a complex system is difficult to know exactly without performing a system level test. (If such a test were to be performed, then there would be no need to perform a component test.) Typically, the HEMP stress at a component is usually determined by analysis, and this is then used to design the proper pulse or CW excitation of the component.

A.2.6 The smoke test

The smoke test, also called the "general test", is the simplest HEMP test to perform. It is a threat-level, transient system test designed to see what happens to a system when excited by HEMP. In this test concept, the system is located in the working volume of a threat-level simulator and the simulator is pulsed one or more times. Aside from the field reference sensor and associated recording equipment, no other data acquisition is needed. It is basically a pass-no-pass test, and is sometimes referred to as a "go-no-go" test.

The advantage of this test is that it is rapid to conduct, needs minimal personnel and planning, and aside from the fixed costs of the system being tested and the simulator facility, it is relatively inexpensive.

There are several disadvantages with this type of test that need to be considered in view of the test's simplicity. First, there is a risk that the system will be permanently damaged by the testing and that costly repairs to the system will be needed. Second, there is usually only one "example" of the system tested. If it survives the test, there is no guarantee that another system of the same type will have the same behaviour. Finally, with this type of test, no information is provided concerning a safety margin.

A.3 Definition of the testing interface

A key aspect of testing is the definition of the testing interface within the system. This can be thought of as the location at which the simulated HEMP stress shall be applied to the system. It is generally recognized that an electrically complex system can be represented by a series of shielding surfaces, or "EM barriers," which are penetrated at selected points by one of several "EM penetration mechanisms," such as diffusion, aperture penetration or conducting penetration. Figure A.1 illustrates such a diagram for a generic electrical system, showing regions of different HEMP-induced electrical stresses (within the horizontal lines), together with the various coupling paths and penetration mechanisms.

Il convient de noter que dans la figure A.1, l'interaction IEMN-HA avec le système a été divisée en deux parties: l'une concerne les pénétrations de la barrière de blindage par diffusion et par des ouvertures, et l'autre les pénétrations le long des trajets conducteurs délibérément aménagés, tels que les lignes de signal, les lignes de commande, les lignes d'alimentation, etc. La présente norme expose les concepts d'essai pour le premier type de pénétrations, notamment les méthodes d'essai pour les enceintes de blindage. La CEI 61000-4-24 expose les méthodes d'essai pour les dispositifs de protection contre les perturbations conduites IEMN-HA et se concentre sur les méthodes d'essai pour injection de signal approprié au niveau des sorties de signal et/ou de puissance du matériel, comme indiqué à la figure A.1.

Les essais pratiqués sur le blindage du système peuvent être réalisés au niveau de n'importe lequel des emplacements d'interface ⁵⁾ désignés par les lettres A à H, qui se déplacent progressivement dans le système. Les essais les plus directs sont effectués au niveau du point d'interface A à l'extérieur du système, où l'excitation est due aux champs extérieurs *E* et *H* produits par IEMN-HA. Au niveau de cet emplacement, il est nécessaire de simuler le comportement des champs IEMN-HA incidents sur l'ensemble du système (plus les éventuels champs réfléchis par des objets proches tels qu'un plan de masse). Si cette simulation est effectuée correctement, la réponse du système est comparable à celle du système soumis à une illumination IEMN-HA.

Le point d'interface B est toujours situé à l'extérieur du système, mais il apparaît après le couplage du champ incident avec l'extérieur du système ainsi que les courants et les charges induits sur le blindage extérieur. Ainsi, l'excitation du système en ce point s'effectue en enlevant une étape par rapport au champ incident. Comme indiqué à la figure A.1, la contrainte IEMN-HA au niveau du diagramme d'interaction peut pénétrer dans le système au travers d'ouvertures, d'éléments de diffusion ou de pénétrations conductrices, souvent appelées plaques collectrices (PoE). Dans le cas d'une illumination de champ, tous ces mécanismes de pénétration sont excités simultanément par le champ incident. Cependant, pour les essais pratiqués au niveau de l'interface B, chaque pénétration est généralement soumise de façon séparée aux essais du fait de la taille du système. Par conséquent, les essais à ce niveau provoquent des erreurs potentielles, non seulement en raison d'une prescription plus complexe relative au comportement temporel des sources d'excitation, mais aussi car les plaques collectrices ne peuvent pas toutes être testées en même temps.

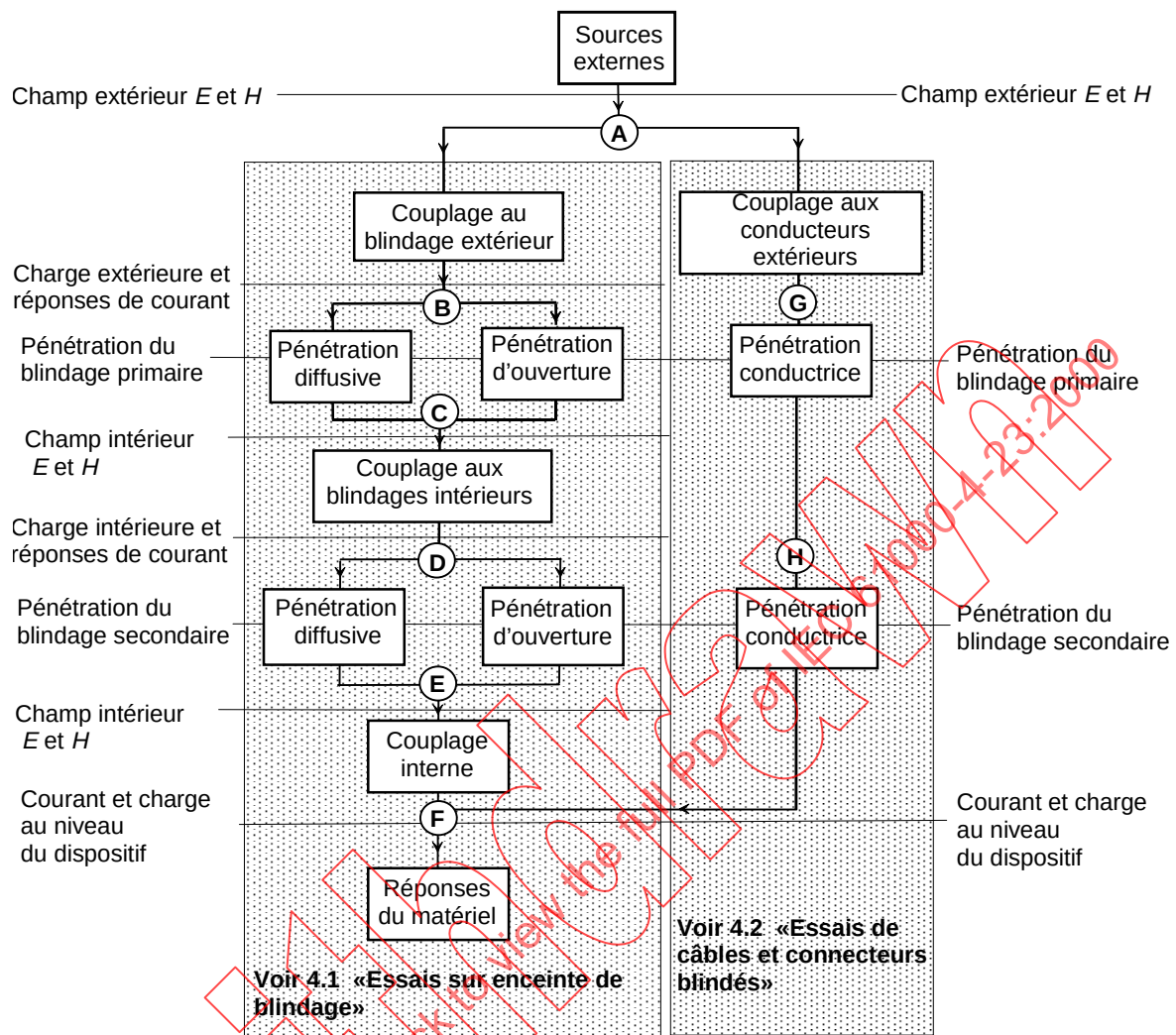
⁵⁾ Noter que ces emplacements d'interface ne sont pas réellement des «points d'essai», car ils ne font pas référence à des emplacements spécifiques sur les câbles ou composants du système. Ils désignent plutôt des emplacements génériques de points d'essai éventuels dans le système.

It should be noted in figure A.1 that the HEMP interaction with the system has been divided into two parts: one which deals with penetrations through the shielding barrier by diffusion and apertures, and another part dealing with penetrations along deliberately made conducting paths, such as signal lines, control lines, power lines, etc. This standard deals with testing concepts for the first type of penetration, namely test methods for shielding enclosures. IEC 61000-4-24 discusses the test methods for protective devices for HEMP-conducted disturbances, which concentrate on test methods for appropriate signal injection onto the signal and/or power leads of equipment, as indicated in figure A.1.

Testing of the shielding of the system can be conducted at any one of the interface locations ⁵⁾, denoted by the letters A through H, which move progressively into the system. The most straightforward testing is at interface point A at the exterior of the system, where the excitation is due to the external *E*- and *H*-fields produced by the HEMP. At this location, it is necessary to simulate the behaviour of the incident HEMP fields over the entire system (plus any reflected fields from nearby objects, such as a ground plane). If this simulation is carried out properly, the response of the system will be comparable to that of the system under HEMP illumination.

Interface point B is still located on the exterior of the system, but it occurs after the incident field has coupled to the system exterior and induced currents and charges on the exterior shield. Thus, the system excitation at this point is one step removed from the incident field. As noted in figure A.1, HEMP stress at this level of the interaction diagram can penetrate into the system through apertures, diffusion, or by conductive penetrations, often referred to as points of entry (PoE). In the field-illuminated case, all of these penetration mechanisms are excited simultaneously by the incident field. In the testing at interface level B, however, each penetration is usually tested separately, due to the size of the system. Consequently, testing at this level gives rise to potential errors, not only because of a more complicated requirement on the temporal behaviour of the excitation sources, but because PoEs are usually not all tested at the same time.

⁵⁾ Note that these interface locations are not actual "test points", as they do not refer to specific locations on cables or components in the system. Rather, they denote generic locations of possible test points within the system.

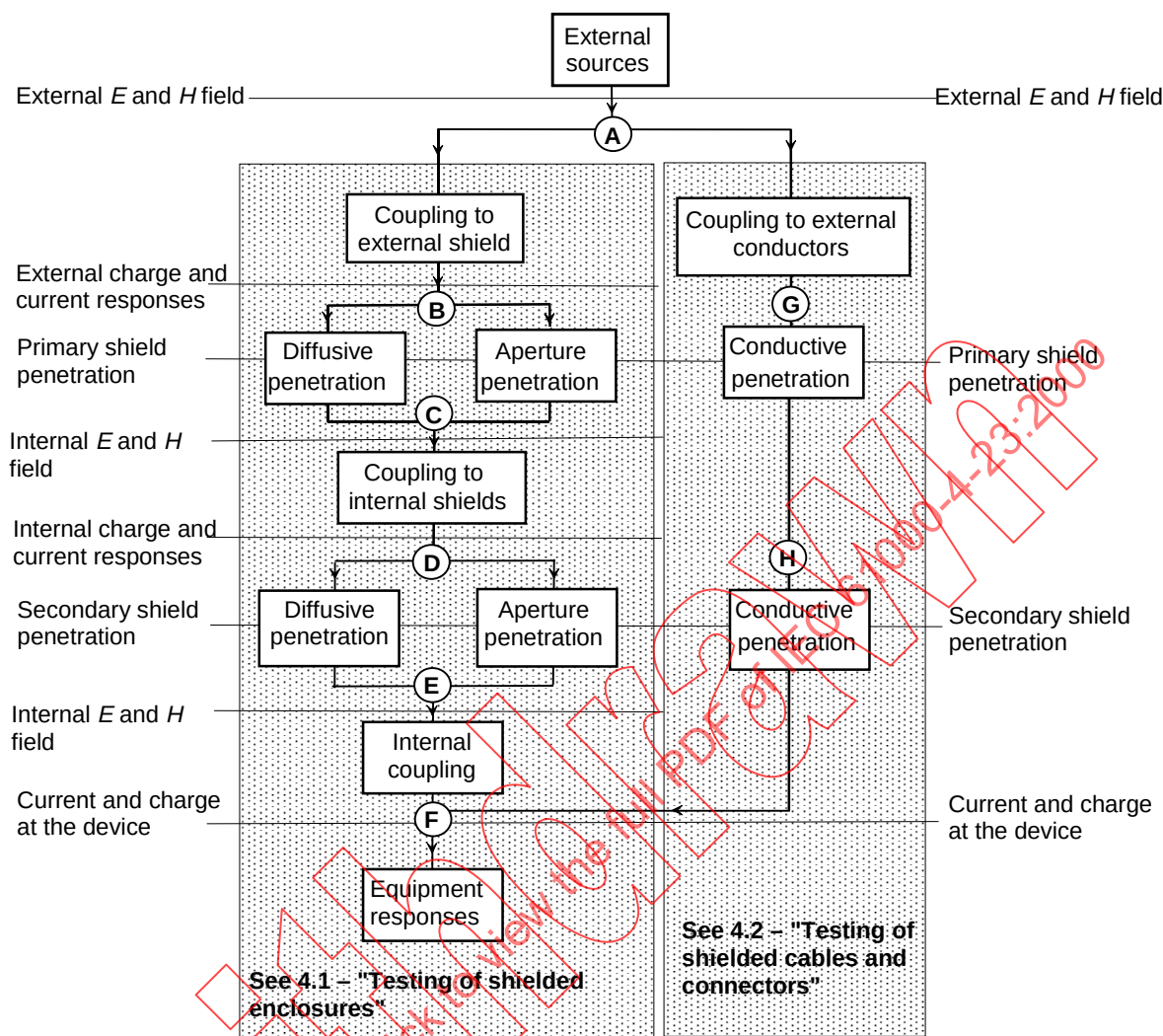


IEC 1742/2000

Figure A.1 – Schéma d'interaction IEMN-HA illustrant les mécanismes de pénétration, les réponses du système et les emplacements d'interface d'essai génériques

Les excitations d'essai nécessaires au niveau de cet emplacement peuvent être décrites en termes de densité de courant injecté et de densité de charge correspondante à la surface du blindage; si l'on considère des conducteurs longs, les sources sont des courants et des tensions extérieurs relatifs à un conducteur de référence adapté (plan de masse). Etant donné que le comportement de ces réponses électriques dépend de la nature de l'excitation IEMN-HA et de la nature électrique de la partie extérieure du système, ces réponses sont plus compliquées que les sources de simulation requises à l'emplacement A.

Plus loin dans le système, le point d'interface C est un point du champ situé à l'intérieur des points de pénétration de la barrière EM primaire. Au niveau de cet emplacement, les réponses IEMN-HA comprennent les champs E et H locaux dans le blindage. Ces champs se propagent à l'intérieur du système et forment un couplage au niveau des surfaces des blindages secondaires du système. Ces blindages comprennent généralement les enceintes des boîtiers individuels ou bâtis et les blindages des câbles. Des courants et charges locaux apparaissent au niveau des surfaces de blindage intérieures, dénotées par l'interface D. Les réponses au niveau de D contiennent tous les effets des résonances de cavité internes, des résonances de câble internes, des perturbations de champ locales dues aux charges internes et une myriade d'autres complications provoquées par un système réaliste.



IEC 1742/2000

Figure A.1 – A sample HEMP interaction diagram illustrating penetration mechanisms, system responses and generic test interface locations

The necessary test excitations at this location can be described in terms of an injected current density and a corresponding charge density on the surface of the shield, or if long conductors are considered, the sources are external currents and voltages relative to a suitable reference conductor (ground plane). Because the behaviour of these electrical responses depends on the nature of the HEMP excitation and on the electrical nature of the exterior of the system, these responses are more complicated than are the required simulation sources at location A.

Moving further into the system, interface point C is a field point at a location just inside the penetration points of the primary EM barrier. At this location, the HEMP responses consist of the local E - and H -fields within the shield. These fields propagate into the interior of the system, and couple to the surfaces of secondary shields in the system. These shields usually consist of the enclosures of individual boxes or equipment racks and the shields of cables. This gives rise to local current and charge on the inner shielding surfaces, denoted by interface D. The responses at D contain all of the effects of internal cavity resonances, internal cable resonances, local field perturbations due to internal loading and a myriad of other complications arising from a realistic system.

Finalement, les courants et charges au niveau de D pénètrent au travers de la couche de blindage secondaire, toujours par pénétrations diffusives ou de type à ouverture, pour générer des champs E et H d'excitation internes au niveau de l'emplacement E. Ces champs sont couplés avec des câbles ou fils internes et conduisent finalement à l'interface d'essai F au niveau du composant ou de la «boîte noire».

Les essais IEMN-HA peuvent être réalisés au niveau de tout emplacement d'interface mentionné auparavant. Cependant, plus l'interface d'essai est située profondément dans le système, plus il est difficile de décrire précisément la contrainte IEMN-HA à appliquer dans l'essai. Ainsi, on constatera un important degré d'incertitude dans les résultats d'essai pour les interfaces d'essai internes. D'autre part, plus l'essai est réalisé à proximité des composants, plus on pourra définir avec précision le comportement des composants ou des boîtes noires en réponse à la contrainte. Par conséquent, un compromis se fait dans le cadre des essais IEMN-HA entre la facilité de description et de simulation de la contrainte souhaitée dans le système, et la précision de détermination de la réponse du système face à cette contrainte.

Comme il est mentionné plus haut, un trajet de couplage supplémentaire apparaît du fait des pénétrations conductrices au travers des blindages et fait apparaître les points d'interface d'essai G et H. Bien qu'il n'y soit pas fait mention dans la présente norme, ils sont indiqués à la figure A.1 pour plus de précision.

A.4 Utilisation des données d'essai

Les données acquises dans le cadre des programmes d'essai peuvent avoir différentes utilisations, en fonction de la nature de l'essai et des prescriptions fonctionnelles du système. Les différentes utilisations des données d'essai sont résumées ci-dessous.

A.4.1 Acceptation de nouveaux systèmes

Un nouveau système conçu pour être renforcé contre les effets IEMN-HA présentera une ou plusieurs spécifications de renforcement dans la conception. A la fin de la construction du système et juste avant la livraison par le fabricant, il est courant de prescrire un essai d'acceptation pour démontrer que le système répond aux spécifications IEMN-HA prescrites.

Les données acquises dans les programmes d'essai peuvent être utilisées pour l'acceptation. Ces essais peuvent être de simples essais d'«épreuve» où la capacité de survie du système est validée, ou peuvent fournir des mesures détaillées des niveaux de contrainte d'interfaces définies et une vérification des marges de sécurité en déterminant la résistance de composants critiques ou d'entrées critiques de sous-systèmes.

A.4.2 Evaluations du système

Pour un système non soumis aux prescriptions de capacité de survie IEMN-HA, ou n'ayant fait l'objet d'aucun essai préalable, un programme d'essai peut fournir des données utiles pour l'évaluation de la condition courante de résistance IEMN-HA. Il s'agit de réaliser des mesures détaillées d'une contrainte induite par IEMN-HA au niveau des points d'interface définis, puis de comparer ces contraintes avec la sensibilité connue (ou estimée) des composants. Cette comparaison des caractéristiques de contrainte/réponse permet une estimation du comportement du système.

A.4.3 Contrôle de la résistance

Lorsqu'un système est considéré comme renforcé pour résister aux IEMN-HA, des mesures périodiques du système peuvent être réalisées pour s'assurer que l'état de résistance reste intact. Fréquemment, ces mesures comprennent des fonctions de transfert à ondes non modulées entre un point d'observation extérieur au système et un point intérieur. Des modifications de cette fonction de transfert sur une période de temps donnée indiquent une dégradation de la résistance du système ou une réduction de la marge de sécurité.

Finally, the currents and charges at D penetrate through the secondary shielding layer, again by diffusive or aperture type penetrations, to create internal excitation E - and H -fields at location E. These fields couple to internal cables or wires and eventually lead to test interface F at the component or "black-box" level.

HEMP testing can be performed at any one of the aforementioned interface locations. However, the deeper the test interface is located within the system, the more difficult it is to accurately describe the HEMP stress needed to apply to the test. Thus, there will be considerable uncertainty in the test results for internal test interfaces. However, the closer the test location is to the components, the more accurate is the knowledge as to the behaviour of the components or black boxes due to the stress. Consequently, one trade-off that occurs in HEMP testing is choosing between the ease of describing and simulating the desired stress on the system, and the accuracy of knowing the response of the system to this stress.

As mentioned earlier, there is an additional coupling path arising from the conducting penetrations through the shields, and these give rise to testing interface points G and H. Although these are not discussed further in this standard, they are shown in figure A.1 for completeness.

A.4 Use of test data

Data acquired under test programs can have several different uses, depending on the nature of the test and on the functional requirements of the system. Different uses of test data are summarized below.

A.4.1 Acceptance of new systems

A new system which is designed to be hardened against the effects of HEMP will have one or more hardness specifications for the design. At the end of the construction of the system and just before formal delivery by the manufacturer, it is common to require an acceptance test to demonstrate that the system meets the required HEMP specifications.

The data acquired in test programs can be used for acceptance purposes. Such tests can be simple "proof" tests where the survivability of the system is validated, or they can amount to detailed measurements of stress levels at the defined interfaces and a verification of safety margins by determining the strength of critical components or critical inputs to subsystems.

A.4.2 System assessments

For a system that is not subject to HEMP survivability requirements, or which has not been previously tested, a test program can provide data useful for assessing the current state of HEMP hardness. This amounts to making detailed measurements of HEMP-induced stress at the defined interface points and then comparing these stresses with the known (or estimated) susceptibility of the components. This comparison of the stress/response characteristics permits an estimation of the system behaviour.

A.4.3 Hardness surveillance monitoring

Once a system is determined as hardened against HEMP, periodic measurements of the system can be made to ensure that the state of hardness remains intact. Frequently, such measurements consist of CW transfer functions from an observation point outside the system to one inside. Changes in this transfer function over a period of time indicate a degradation in the hardness of the system or a reduction of the safety margin.

A.4.4 Conception du système

La conception d'un nouveau système est une des applications finales des données d'essai. L'expérience des essais du système peut permettre de comprendre comment améliorer la résistance du matériel et comment concevoir, à partir du stade de construction, un système résistant aux IEMN-HA. En outre, un essai de composant (ou banc d'essai) peut fournir des informations sur les réponses de composants et sous-systèmes aux transitoires IEMN-HA pouvant servir aux essais et évaluations au niveau du système.

A.5 Incertitudes d'essai

Dans chacun des concepts d'essai décrits ci-dessus, des incertitudes ajoutent des erreurs au niveau des résultats d'essai finaux. Généralement, ces erreurs sont difficiles à évaluer de façon quantitative, mais une liste d'incertitudes aide au moins le personnel à prendre conscience des difficultés potentielles liées aux essais. Des incertitudes significatives peuvent résulter des points suivants:

- a) Manque de connaissance de l'environnement IEMN-HA incident, décrit par son angle d'incidence et la polarisation par rapport à la terre.
- b) Variabilité de la forme d'onde IEMN-HA en fonction de l'emplacement du système sur la terre, et incapacité à simuler cette forme d'onde de façon précise en raison:
 - 1) de variations spatiales non idéales du champ IEMN-HA simulé;
 - 2) de la connaissance imprécise des propriétés électriques du sol;
 - 3) d'erreurs dans les calculs d'extrapolation d'une réponse de bas niveau à des niveaux IEMN-HA;
 - 4) d'erreurs de mesure;
 - 5) d'un manque d'informations précises sur les niveaux de défaillance des composants;
 - 6) d'une dégradation inconnue de la résistance du système dans le temps;
- c) On introduit une source finale d'incertitude dans le processus d'essai par désir de déduire trop d'éléments d'un simple essai limité. Seul un nombre fini d'excitations peut être considéré dans un essai et, par conséquent, toute déduction statistique concernant la probabilité de survie d'un système face aux IEMN-HA sera incomplet. De plus, même si un système est entièrement testé et caractérisé, il est difficile d'extrapoler les résultats à un ensemble de systèmes similaires. Chaque système peut être (et est généralement) électriquement distinct des autres et, par conséquent, les détails des réponses IEMN-HA peuvent varier considérablement entre les systèmes. C'est pourquoi l'utilisation d'une marge de sécurité est utile pour le renforcement.

A.4.4 System design

Another use of test data is in the area of new system design. Experience in system testing can lead to an understanding of how better to harden equipment and how to design, from the ground up, a HEMP hardened system. In addition, component (or laboratory "bench" testing) can provide information about component and subsystem responses to HEMP transients that can ultimately be useful for system-level testing and assessments.

A.5 Testing uncertainties

In each of the testing concepts described above, there are uncertainties which add errors to the final test results. Generally, these errors are difficult to know quantitatively, but a list of the uncertainties will at least help the test personnel to be aware of potential difficulties with the testing. Significant uncertainties can result from the following:

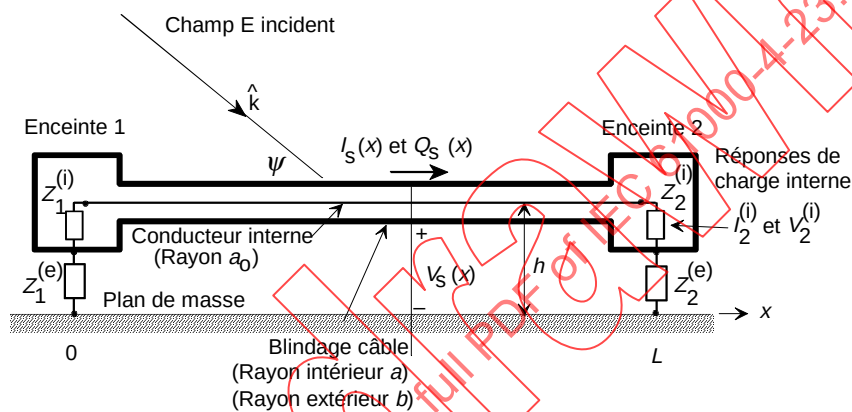
- a) A lack of knowledge of the incident HEMP environment, as described by its angle of incidence and polarization relative to the earth.
- b) The variability of the HEMP waveform as a function of the system location on the earth, and the inability to simulate this waveform precisely because of
 - 1) non-ideal spatial variations of the simulated HEMP field;
 - 2) an imprecise knowledge of the electrical properties of the ground;
 - 3) errors in the calculations for extrapolating a low-level response to HEMP levels;
 - 4) measurement errors;
 - 5) lack of precise information of the failure levels of components;
 - 6) unknown degradation of the system hardness over time.
- c) A final source of uncertainty in the test process is often introduced by the desire to know too much from a single limited test. Only a finite number of excitations can be considered in a test, and consequently, any statistical inference about the probability of system survival against HEMP will be incomplete. Furthermore, even if one system is thoroughly tested and characterized, it is difficult to extrapolate the results to an ensemble of similar systems. Each system can be (and usually is) electrically distinct from the others, and consequently, the details of the HEMP responses can vary considerably from system to system. This is why the use of a safety margin in hardening is useful.

Annexe B (informative)

Caractérisation des câbles blindés

B.1 Notions fondamentales relatives au blindage de câble

Dans sa configuration la plus simple, une ligne de transmission blindée comprend un câble dont le blindage est connecté à chacune des enceintes. Les enceintes et le câble sont généralement situés sur un plan de masse conducteur, le câble étant placé à une hauteur h . Comme indiqué à la figure B.1, les deux enceintes sont connectées au plan de masse par des impédances externes $Z^{(e)}$ de façon à pouvoir étudier à la fois une configuration de circuit mis à la masse et de circuit ouvert.



IEC 1743/2000

Figure B.1 – Géométrie d'une ligne coaxiale blindée avec circuit interne

Pour un câble blindé illuminé par un champ électromagnétique, les champs électriques et magnétiques extérieurs peuvent pénétrer au travers d'imperfections de la gaine du câble et provoquer des courants et tensions parasites sur les conducteurs internes. Cette annexe ne couvre pas les pénétrations de champ supplémentaires susceptibles de survenir au travers des enceintes à l'une ou l'autre des extrémités de la ligne.

Le couplage par le blindage du câble entre le champ électromagnétique extérieur et les conducteurs internes se produit selon trois phénomènes de base:

- la diffusion des champs E et H au travers du matériau de la gaine;
- la pénétration des champs au travers des petites ouvertures des blindages tressés;
- un phénomène d'induction plus complexe dû au chevauchement des brins individuels (ou des supports) du blindage.

Les deux derniers phénomènes surviennent uniquement pour les blindages tressés.

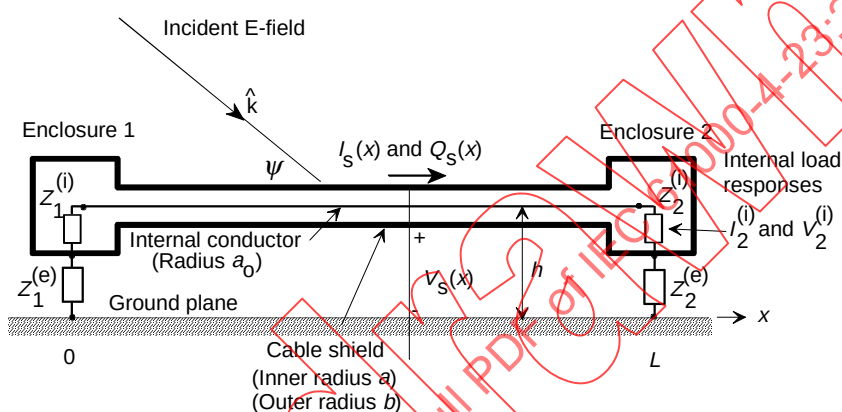
Le comportement de la réponse induite sur les conducteurs internes d'un câble blindé peut être décrit en termes d'impédance de transfert Z_l et d'admittance de transfert Y_l du blindage. Pour comprendre les concepts d'impédance et d'admittance de transfert, on considère un champ EM extérieur à variation temporelle qui induit un courant de gaine de câble I_s et une tension gaine/masse V_s (ou, de façon équivalente, une densité de charge de gaine). Certaines parties des champs électriques et magnétiques extérieurs peuvent pénétrer au travers du blindage et induire des réponses de tension et de courant internes, V_i et I_i , respectivement. Ces grandeurs et leurs polarités présumées sont indiquées à la figure B.1. Pour ce système de conducteur, un courant de retour I_g circule dans le sol; ce courant est la somme de I_s et I_i .

Annex B (informative)

Characterization of shielded cables

B.1 Fundamentals of cable shielding

In its simplest configuration, a shielded transmission line system consists of a cable with the shield connected to each of the enclosures. The enclosures and the cable are usually located over a conducting ground plane with the cable at a height h . As shown in figure B.1, the two enclosures are connected to the ground plane by external impedances $Z^{(e)}$ so that either a grounded or open-circuit configuration can be considered.



IEC 1743/2000

Figure B.1 – Geometry of a shielded coaxial line with an internal circuit

For a shielded cable illuminated by an electromagnetic field, the external electric and magnetic fields can penetrate through imperfections in the cable sheath and give rise to disturbing currents and voltages on the internal conductors. This annex does not cover additional field penetration that may occur through the enclosures at either end of the line.

The coupling through the cable shield between the external electromagnetic field and the inner conductors occurs through three basic phenomena:

- diffusion of the E and H -fields through the sheath material;
- penetration of the fields through the small apertures of the braided shields;
- a more complicated induction phenomenon due to the overlapping of the individual strands (or carriers) of the shield.

The last two phenomena occur only for braided shields.

The behaviour of the induced response on the inner conductors of a shielded cable can be described in terms of a transfer impedance Z_t and a transfer admittance Y_t of the shield. To understand the transfer impedance and admittance concepts, a time-varying external EM field which induces both a cable sheath current I_s and a sheath-to-ground voltage V_s (or equivalently, a sheath charge density) is considered. Portions of the external electric and magnetic fields are able to penetrate through the shield, and these induce internal voltage and current responses, V_i and I_i , respectively. These quantities and their assumed polarities are shown in figure B.1. For this conductor system, a return current I_g flows in the ground; this current is the sum of I_s and I_i .

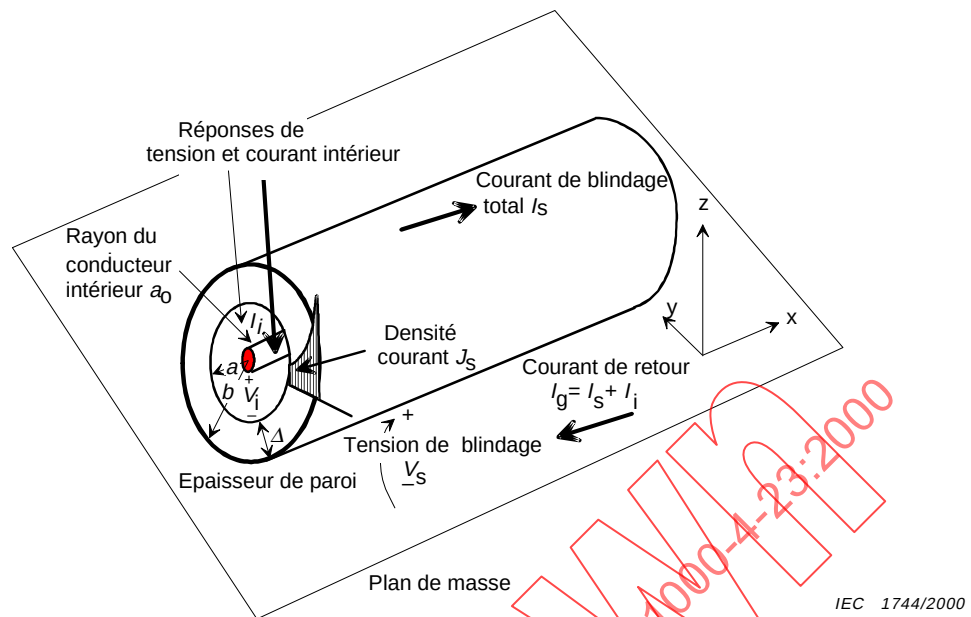


Figure B.2 – Câble coaxial situé sur un plan de masse conducteur

Le flux de courant dans la gaine de câble crée un champ électrique axial à l'intérieur de la gaine. En raison de l'effet de peau, la répartition du courant et la répartition de champ électrique associée dans la section transversale de la gaine ne sont pas uniformes. Si I_s est le courant total circulant dans la gaine, le champ électrique E_i sur la surface intérieure du blindage est produit par une densité de courant atténuée, la réduction étant déterminée approximativement par δ , la profondeur de peau dans le matériau de blindage, donnée par:

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \sigma \mu)} \text{ m} \quad (\text{B.1})$$

où

σ est la conductivité du matériau de la gaine;

f est la fréquence du courant induit;

μ est la perméabilité du matériau de la gaine.

Cette composante de champ électrique axial sur la surface intérieure de la gaine crée une tension entre les conducteurs internes et la gaine et, en fonction des impédances de terminaison du conducteur de signal interne, un courant peut circuler. La capacité de protection du blindage de câble est déterminée par la réduction de la composante de champ électrique due à l'atténuation de la profondeur de peau. Cette capacité de réduction est déterminée plus précisément dans l'article B.2 grâce au concept d'impédance de transfert, défini comme le rapport entre le champ électrique intérieur E_i et le courant de blindage total I_s dans le domaine fréquentiel.

La dualité en termes d'effet de champ électrique de l'impédance de transfert est l'admittance de transfert. Elle décrit le processus par lequel une partie de la charge induite sur la gaine du câble chemine sur le câble interne à l'intérieur du blindage. Cette induction de charge sur le conducteur interne revient à un courant injecté sur le câble interne. Cet effet peut être lié à la tension blindage/sol extérieure V_s par une admittance de transfert.

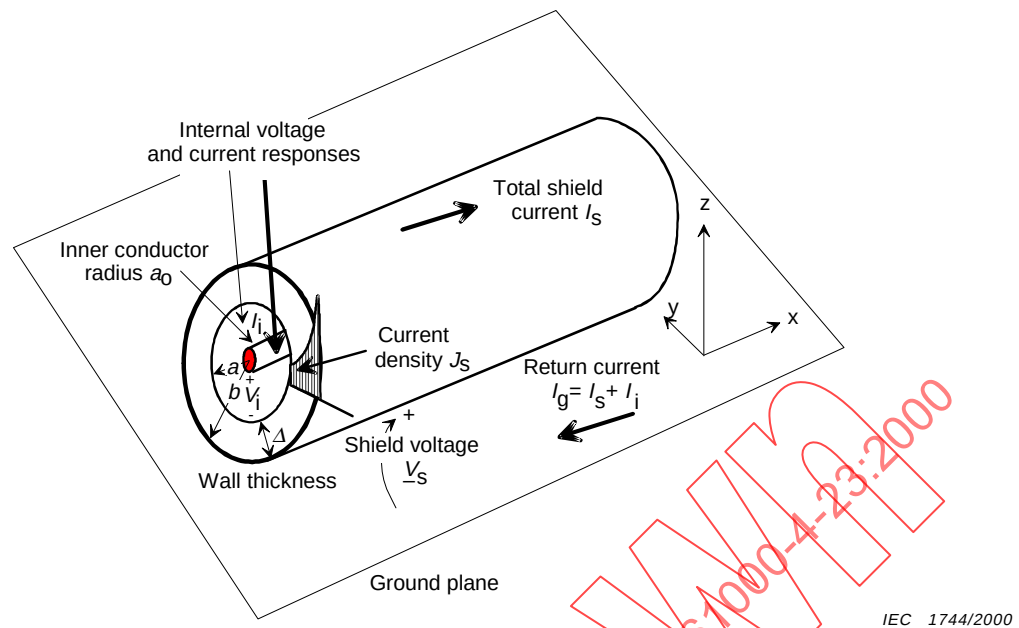


Figure B.2 – A coaxial cable located over a conducting ground plane

The current flow in the cable sheath creates an axial electric field inside the sheath. Due to the skin effect, the current distribution and the associated electric field distribution in the sheath cross-section are not uniform. If I_s is the total current flowing in the sheath, the electric field E_i on the inner surface of the shield is produced by an attenuated current density, with the reduction being determined approximately by δ , the skin depth in the shield material, given by

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \sigma \mu)} \quad \text{m} \quad (\text{B.1})$$

where

σ is the conductivity of the sheath material;

f is the frequency of the induced current;

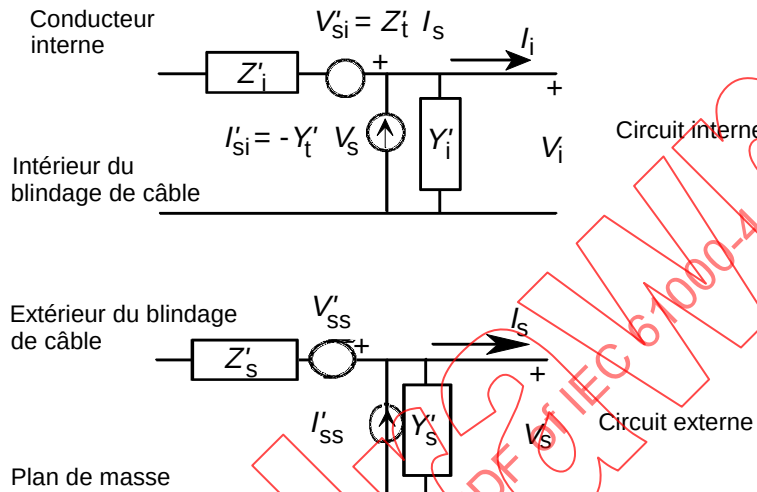
μ is the permeability of the sheath material.

This axial electric field component on the inner surface of the sheath creates a voltage between the internal conductors and the sheath, and, depending on the termination impedances of the inner signal conductor, a current may flow. The protection capability of the cable shield is determined by the amount of reduction of the electric field component due to the skin depth attenuation. This reduction capability is determined more precisely in clause B.2 through the concept of a transfer impedance, which is defined as the ratio between the inner electric field E_i and the total shield current I_s in the frequency domain.

The electrical dual of the transfer impedance is the transfer admittance, which describes the process by which a portion of the induced charge on the cable sheath finds its way onto the internal wire inside the shield. This induction of charge on the inner conductor amounts to an injected current on the internal cable. This effect can be related to the external shield-to-ground voltage V_s by a transfer admittance.

B.2 Définitions de l'impédance et de l'admittance de transfert

La gaine de câble et son retour extérieur (généralement un plan de masse) ainsi que le conducteur interne forment deux circuits couplés, comme indiqué à la figure B.2. On présume, dans ce développement, que le circuit externe est indépendant du comportement du circuit interne, et que le circuit interne comporte une source commandée en tension et en courant fournissant l'excitation à partir du circuit externe. Cette configuration de circuit part du principe que le circuit constitue un blindage satisfaisant.



IEC 1745/2000

Figure B.3 – Deux circuits par unité de longueur formés par la gaine et son retour à la masse ainsi que la gaine et le conducteur interne

Pour ces deux lignes couplées, le courant et la tension I_s et V_s du blindage extérieur ainsi que le courant et la tension I_i et V_i du conducteur interne sont décrits par l'ensemble d'équations différentielles suivant:

$$\text{Circuit externe: } \frac{dV_s}{dx} + Z'_s I_s = V'_{ss} \quad \text{V/m} \quad (\text{B.2a})$$

$$\frac{dI_s}{dx} + Y'_s V_s = I'_{ss} \quad \text{A/m} \quad (\text{B.2b})$$

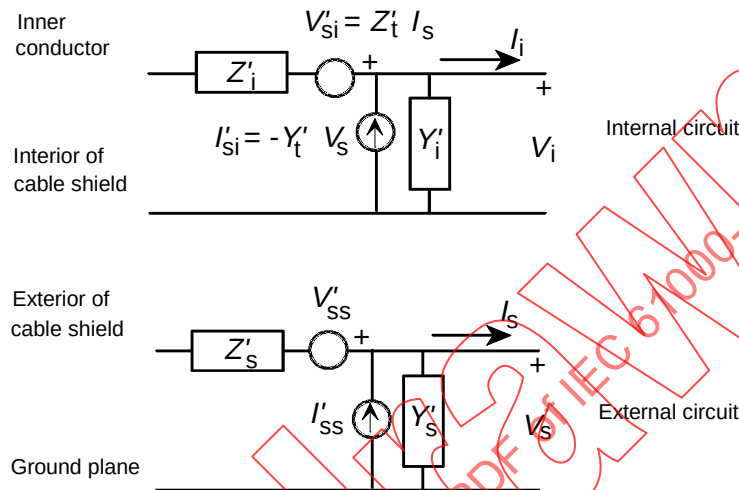
$$\text{Circuit interne: } \frac{dV_i}{dx} + Z'_i I_i = V_{si} \quad \text{V/m} \quad (\text{B.3a})$$

$$\frac{dI_i}{dx} + Y'_i V_i = I_{si} \quad \text{A/m} \quad (\text{B.3b})$$

Dans ces expressions, la ligne de transmission extérieure est décrite par les paramètres d'impédance et d'admittance par unité de longueur Z'_s et Y'_s qui, pour une ligne sans perte, sont liés aux grandeurs d'inductance et de capacité de ligne par unité de longueur selon les équations $Z'_s = j\omega L'_s$ et $Y'_s = j\omega C'_s$. De façon similaire, pour un câble sans perte, les paramètres de ligne interne Z'_i et Y'_i sont liés à l'inductance et la capacité de ligne par unité de longueur suivant les formules $Z'_i = j\omega L'_i$ et $Y'_i = j\omega C'_i$.

B.2 Definitions of transfer impedance and transfer admittance

The cable sheath with its external return (generally a ground plane) and the internal conductor form two coupled circuits, as shown in figure B.2. In this development it is assumed that the external circuit is independent of the behaviour of the internal circuit, and that the internal circuit has both a voltage- and current-controlled source providing the excitation from the external circuit. This circuit configuration results from the assumption that the cable performs as a good shield.



IEC 1745/2000

Figure B.3 – Two per-unit-length circuits formed by the sheath and its ground return and the sheath and the internal conductor

For these two coupled lines, the current and voltage I_s and V_s of the outer shield and the current and voltage I_i and V_i of the inner conductor are described by the following set of differential equations:

$$\text{External circuit:} \quad \frac{dV_s}{dx} + Z'_s I_s = V'_{ss} \quad \text{V/m} \quad (\text{B.2a})$$

$$\frac{dI_s}{dx} + Y'_s V_s = I'_{ss} \quad \text{A/m} \quad (\text{B.2b})$$

$$\text{Internal circuit:} \quad \frac{dV_i}{dx} + Z'_i I_i = V_{si} \quad \text{V/m} \quad (\text{B.3a})$$

$$\frac{dI_i}{dx} + Y'_i V_i = I_{si} \quad \text{A/m} \quad (\text{B.3b})$$

In these expressions, the external transmission line is described by the per-unit-length impedance and admittance parameters Z'_s and Y'_s , which for a lossless line are related to the external per-unit-length line inductance and capacitance quantities by $Z'_s = j\omega L'_s$ and $Y'_s = j\omega C'_s$. Similarly, for a lossless cable the internal line parameters Z'_i and Y'_i are related to the internal per-unit-length line inductance and capacitance by $Z'_i = j\omega L'_i$ and $Y'_i = j\omega C'_i$.

Les sources d'excitation primaires dans ce problème sont les sources de tension et de courant réparties V'_{ss} et I'_{ss} sur le circuit extérieur. Les sources d'excitation pour le circuit intérieur sont les sources de tension et de courant présentées à la figure B.1 et sont désignées respectivement par V'_{si} et I'_{si} . Ces sources internes sont reliées aux réponses de ligne externes par les formules suivantes:

$$V'_{si} = Z'_t I_s \quad \text{V/m} \quad (\text{B.4a})$$

$$I'_{si} = Y'_t V_s \quad \text{A/m} \quad (\text{B.4b})$$

où Z'_t et Y'_t sont l'impédance de transfert par unité de longueur et l'admittance de transfert par unité de longueur du blindage. Ces grandeurs peuvent être définies de façon formelle d'après les équations (B.3a) et (B.3b) en attribuant à I_i et V_i des valeurs nulles, comme suit:

$$Z'_t = \left. \frac{1}{I_s} \frac{dV_i}{dx} \right|_{I_i=0} \quad \Omega/\text{m} \quad (\text{B.5a})$$

$$Y'_t = - \left. \frac{1}{V_s} \frac{dI_i}{dx} \right|_{V_i=0} \quad \text{S/m} \quad (\text{B.5b})$$

Dans la définition de l'impédance de transfert de l'équation (B.5a), le paramètre résultant Z'_t dépend uniquement de la composition électrique et physique du câble blindé. Cependant, cela ne s'applique pas à l'admittance de transfert dans l'équation (B.5b) car la tension du blindage extérieur V_s , dépend de la géométrie du conducteur extérieur. Plus spécifiquement, l'impédance de transfert dépend de la capacité externe du blindage de câble par rapport au plan de masse de référence.

Pour remplacer une évaluation de la source d'excitation de courant interne utilisant l'équation (B.4b), il est possible d'assimiler la réponse externe pertinente à la densité de charge externe sur le blindage de câble, q'_e , au lieu de la tension blindage/sol externe. De cette manière, la source de courant interne peut être exprimée par:

$$I'_{si} = -j\omega C'_i S_s q'_e \quad (\text{B.6})$$

où

C'_i est la capacité par unité de longueur de la ligne interne;

S_s est un coefficient de fuite du blindage (mesuré en mètres par Farad) qui dépend uniquement des caractéristiques du blindage.

Généralement, le coefficient de fuite du blindage S_s est le meilleur indicateur de comportement du blindage de câble car il est indépendant de la géométrie de ligne externe. Cependant, les techniques de mesure permettent souvent de connaître directement Y'_t au lieu de S_s . Une fois que Y'_t est connu pour un montage d'essai particulier, le paramètre de câble réel peut être déterminé par l'expression:

$$S_s = \frac{1}{j\omega C'_i} \frac{Y'_t}{C'_e} \quad (\text{B.7})$$

The primary excitation sources in this problem are the distributed voltage and current sources V'_{ss} and I'_{ss} on the external circuit. The excitation sources for the internal circuit are the voltage and current sources shown in figure B.1 and are denoted by V'_{si} and I'_{si} , respectively. These internal sources are related to the external line responses by

$$V'_{si} = Z'_t I_s \quad \text{V/m} \quad (\text{B.4a})$$

$$I'_{si} = Y'_t V_s \quad \text{A/m} \quad (\text{B.4b})$$

where Z'_t and Y'_t are the transfer impedance per unit length and transfer admittance per unit length of the shield. These quantities may be formally defined from equations (B.3a) and (B.3b) by setting I_i and V_i to zero, as

$$Z'_t = \left. \frac{1}{I_s} \frac{dV_i}{dx} \right|_{I_i=0} \quad \Omega/\text{m} \quad (\text{B.5a})$$

$$Y'_t = - \left. \frac{1}{V_s} \frac{dI_i}{dx} \right|_{V_i=0} \quad \text{S/m} \quad (\text{B.5b})$$

In the definition of the transfer impedance in equation (B.5a), the resulting parameter Z'_t depends only on the electrical and physical composition of the shielded cable. This is not true for the transfer admittance in equation (B.5b), however, because the external shield voltage V_s , depends on the geometry of the external conductor. More specifically, the transfer impedance depends on the external capacitance of the cable shield to the reference ground plane.

An alternative to evaluating the internal current excitation source as in equation (B.4b) is to consider the pertinent external response to be the external charge density on the cable shield, q'_e , instead of the external shield-to-ground voltage. In this manner, the internal current source can be written as

$$I'_{si} = -j\omega C'_i S_s q'_e \quad (\text{B.6})$$

where

C'_i is the per-unit-length capacitance of the internal line;

S_s is a shield leakage factor (measured in metres/Farad) and which depends only on the shield characteristics.

Typically, the shield leakage factor S_s is the more desirable indicator of cable shield behaviour, as it is independent of the external line geometry. However, measurement techniques frequently provide a direct knowledge of Y'_t instead of S_s . Once Y'_t is known for a particular test set-up, the actual cable shield parameter can be determined by the expression

$$S_s = \frac{1}{j\omega C'_i} \frac{Y'_t}{C'_e} \quad (\text{B.7})$$

B.3 Importance relative de Z'_t et Y'_t

Les définitions de l'impédance et de l'admittance de transfert du blindage de câble des équations (B.5a) et (B.5b) décrites ci-dessus s'appliquent à la fois aux câbles solides tubulaires et tressés. Pour un blindage tubulaire solide, le blindage électrostatique est largement supérieur au blindage magnétostatique et, par conséquent, l'impédance de transfert domine à basse fréquence. Ce fait a amené certains chercheurs à négliger l'admittance de transfert dans les problèmes de couplage CEM.

Pour les câbles tressés, on met l'accent sur les mécanismes de couplage générant l'impédance et l'admittance de transfert, du fait de la pénétration des champs E et H à travers des ouvertures du blindage. Là encore, à des fréquences faibles, le blindage électrostatique de la tresse est largement supérieur au blindage de champ magnétique, et Y'_t est généralement faible par rapport à Z'_t . Cependant, quand la fréquence augmente, les champs E et H peuvent pénétrer à travers les ouvertures de la tresse. Dans ce cas, les effets induits sur le conducteur interne par les composantes de champ peuvent être du même ordre d'amplitude. Pour les blindages qui ne sont pas correctement conçus pour exclure le champ E , le fait de négliger l'admittance de transfert peut provoquer des facteurs approximatifs de 2 erreurs dans les réponses internes estimées.

B.3 Relative significance of Z'_t and Y'_t

The definitions of the transfer impedance and admittance of the cable shield in equations (B.5a) and (B.5b) as described above are valid for both solid tubular and braided cables. For a solid tubular shield, the electrostatic shielding is much greater than the magnetostatic shielding, and, as a result, the transfer impedance term dominates at low frequencies. This fact has led some investigators to neglect the transfer admittance term in EMC coupling problems.

For braided cables, the coupling mechanisms giving rise to the transfer impedance and admittance are enhanced, due to the E - and H -field penetration through the shield apertures. Again, at low frequencies, the electrostatic shielding of the braid is much better than the magnetic field shielding, and Y'_t is usually small compared with Z'_t . However, as the frequency increases, both the E - and H -fields are able to penetrate through the braid apertures. In this case, the induced effects on the inner conductor from both field components can be of the same order of magnitude. For shields that are not well designed to exclude the E -field, neglecting the transfer admittance may lead to roughly factors of 2 error in the estimated internal responses.

Annexe C (informative)

Matériel de mesure des impulsions IEMN-HA

C.1 Introduction

Au fil des années, on a développé un matériel spécifique pour la mesure de transitoires rapides sur les systèmes. Ce matériel se divise en trois grandes catégories:

- les capteurs conçus pour mesurer une réponse transitoire;
- les liaisons de données pour la transmission d'informations de mesure entre le point d'essai et une unité d'analyse;
- un dispositif d'enregistrement transitoire capable de stocker les données mesurées.

Pour chacun de ces composants, un effort considérable a été apporté afin d'optimiser leur conception et leurs performances. On intègre les considérations suivantes:

- largeur de bande suffisante pour mesurer de façon précise les transitoires rapides induits par les IEMN-HA;
- distorsion de phase minimale permettant de maintenir l'intégrité des formes d'impulsion mesurées;
- perte minimale entre extrémités dans la chaîne de mesure pour donner un rapport signal sur bruit élevé;
- étalonnage normalisé des sondes et capteurs de mesure.

La présente annexe fournit des informations de base sur les éléments-clés d'un système de mesure d'impulsion IEMN-HA.

C.2 Capteurs pour mesures IEMN-HA

C.2.1 Capteurs de champ B et H

Les capteurs utilisés pour la mesure du champ magnétique transitoire sont essentiellement de petites boucles pouvant être configurées de manière à minimiser une éventuelle réponse supplémentaire induite par le champ E sur le capteur. Tous ces capteurs créent une tension aux bornes des boucles proportionnelle à la vitesse de variation temporelle du flux magnétique passant au travers des boucles. On les désigne souvent par le terme de capteur de point B , car ils répondent effectivement au dérivé du champ B .

La figure C.1 illustre plusieurs configurations courantes pour ces boucles de mesure. Les deux premières (en haut de la figure) sont configurées pour fonctionner conjointement avec un conducteur de référence représentant un plan de masse. Elles peuvent donc fournir une indication sur le courant de surface induit circulant sur le conducteur. Les autres sont destinées à fonctionner à l'écart d'un conducteur de référence, mesurant ainsi la réponse en «champ libre» du champ H .

Annex C (informative)

Equipment for HEMP pulse measurements

C.1 Introduction

Over the years, specialized equipment has evolved for performing fast transient measurements on systems. This equipment falls into three broad categories:

- sensors designed to measure a transient response;
- data links to transmit the measured information from the test point to an analysis station;
- a transient recording device capable of storing the measured data.

For each of these components, considerable effort has gone into their design and performance optimization. Considerations have included the following:

- sufficient bandwidth to accurately measure the fast HEMP-induced transients;
- minimal phase distortion to maintain the integrity of measured pulse shapes;
- minimal end-to-end loss in the measurement chain to provide a high signal-to-noise ratio;
- standard calibration of the measurement probes and sensors.

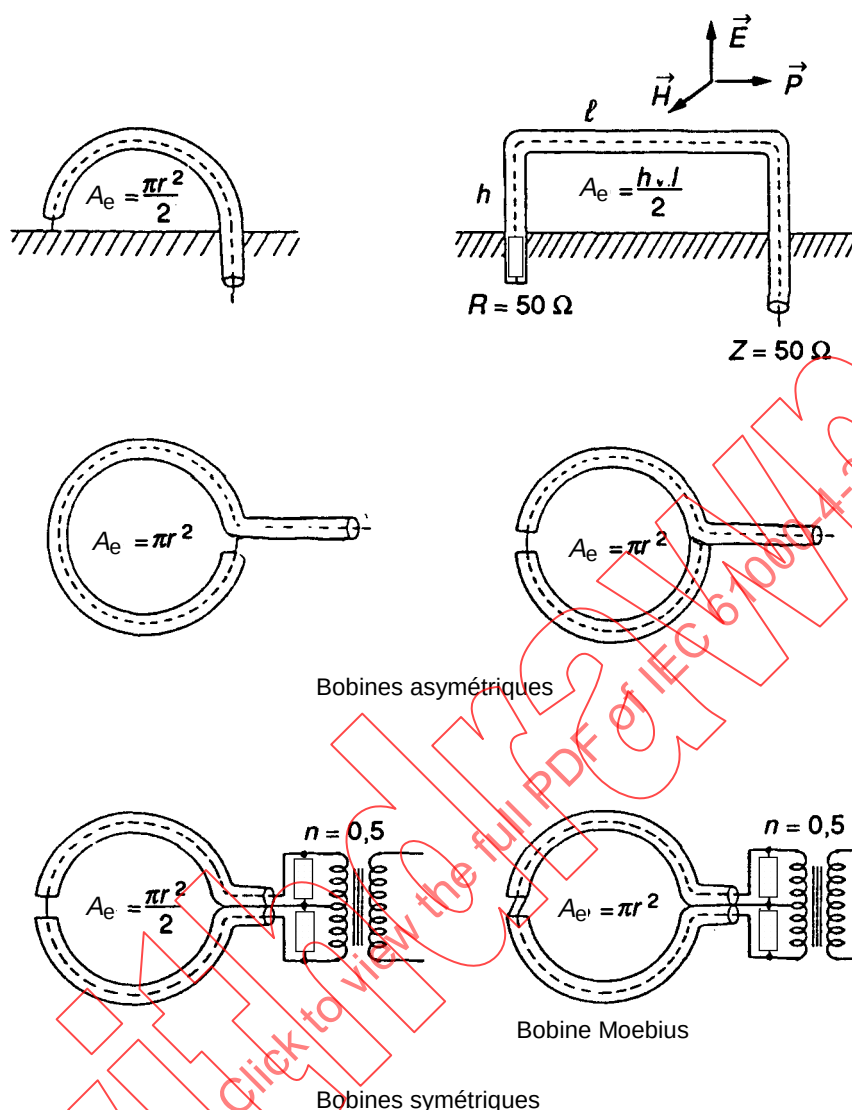
This annex provides basic information on the key elements of a HEMP pulse measurement system.

C.2 Sensors for HEMP measurements

C.2.1 *B*- and *H*-field sensors

Sensors for measuring the transient magnetic field are essentially small loops which may be configured in such a way as to minimize any additional response that the *E*-field may induce on the sensor. All of these sensors create a voltage across the loops that is proportional to the time rate of change of the magnetic flux passing through the loops. Thus, they are often referred to as *B*-dot sensors, as they actually respond to the derivative of the *B*-field.

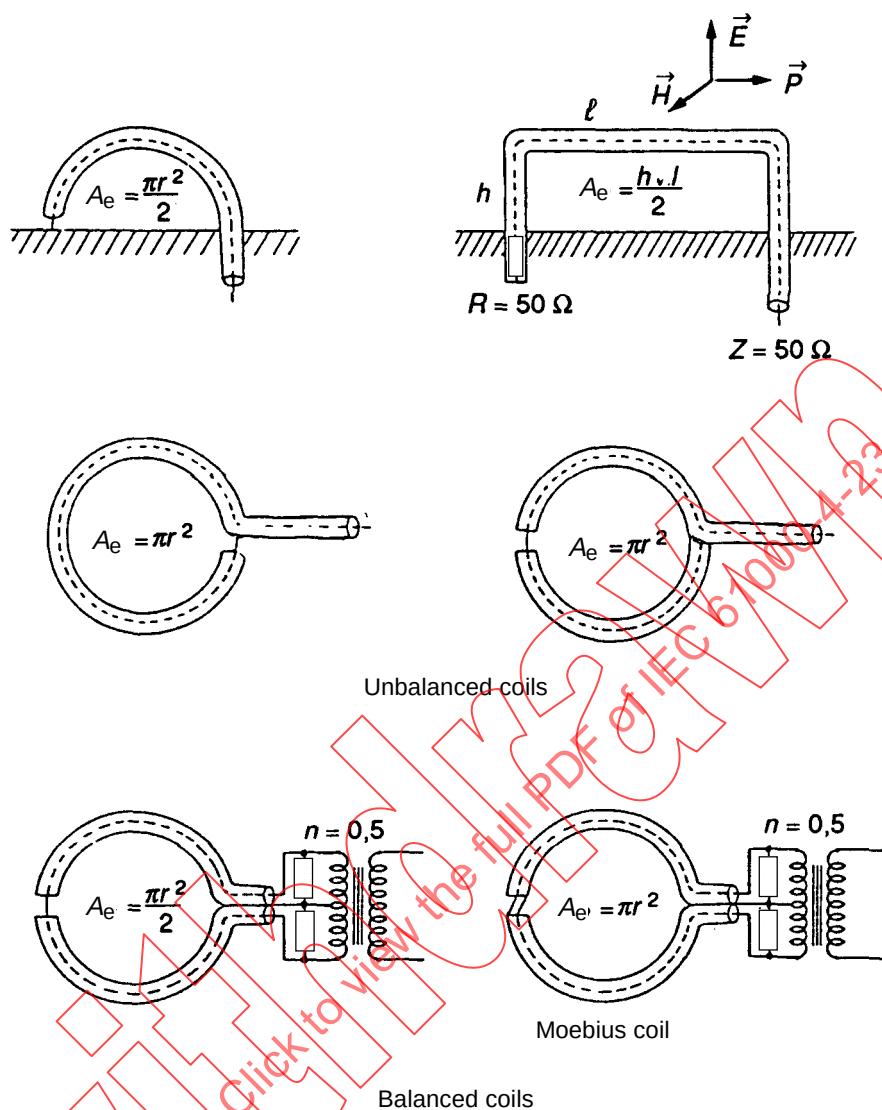
Figure C.1 illustrates several common configurations for such measurement loops. The first two (on the top of the figure) are configured to work in conjunction with a reference conductor as a ground plane. Hence they can provide an indication of induced surface current flowing on the conductor. The others are for operation away from a reference conductor, and thus they measure the "free-field" response of the *H*-field.



IEC 1746/2000

Figure C.1 – Capteurs de champ magnétique [22]

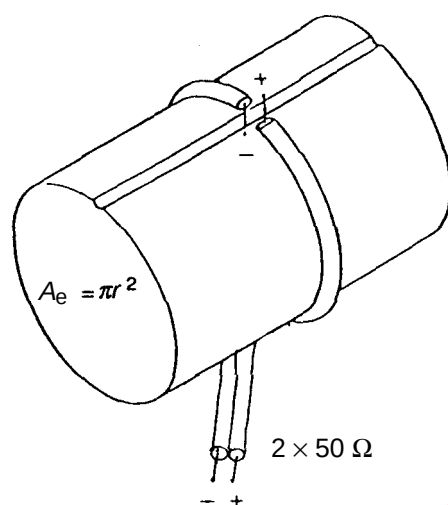
Les capteurs IEMN-HA de champ H présentent également d'autres types de configurations de bobine. La figure C.2 illustre un capteur à bobine cylindrique présentant une seule fente au niveau de laquelle la tension induite est mesurée avec deux câbles coaxiaux blindés, fournissant une sortie symétrique. La figure C.3 présente des configurations à deux et quatre entrefers pour la bobine cylindrique.



IEC 1746/2000

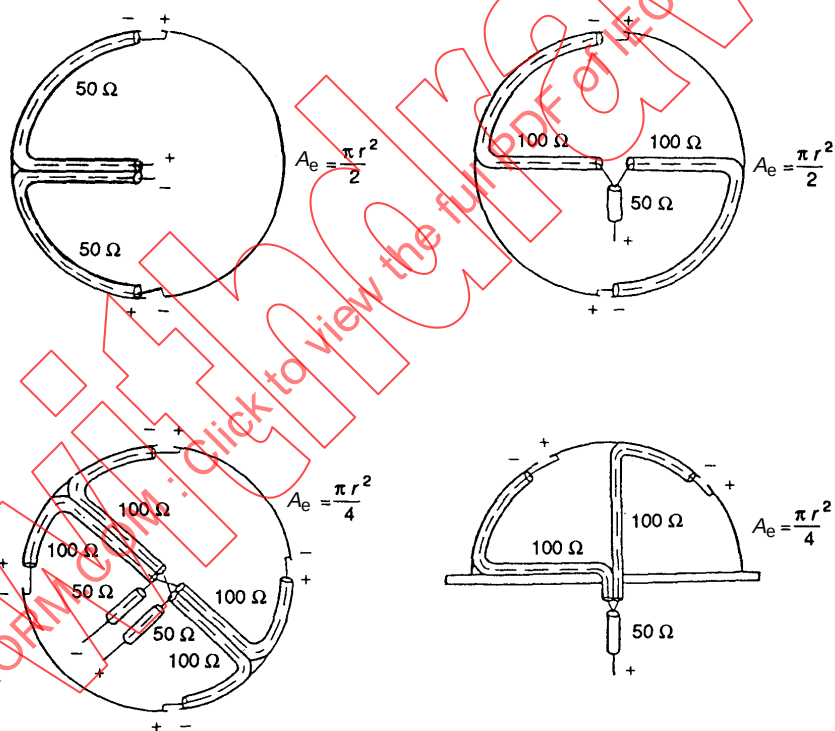
Figure C.1 – Magnetic field sensors [22]

Other types of coil configurations are also found in H -field HEMP sensors. Figure C.2 illustrates a cylindrical coil sensor having a single slot across which the induced voltage is measured with two shielded coaxial cables, providing a balanced output. Figure C.3 shows two- and four-gap configurations for the cylindrical coil.



IEC 1747/2000

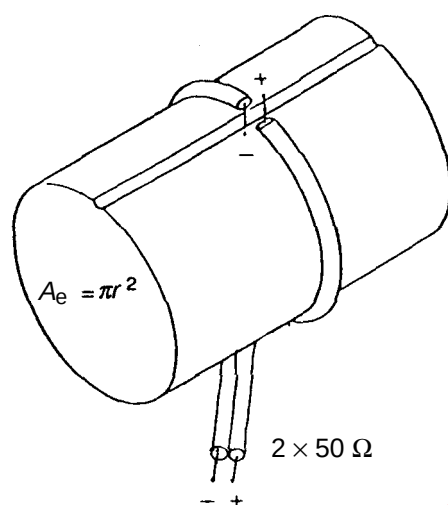
Figure C.2 – Capteur à fente unique, à bobine cylindrique [22]



IEC 1748/2000

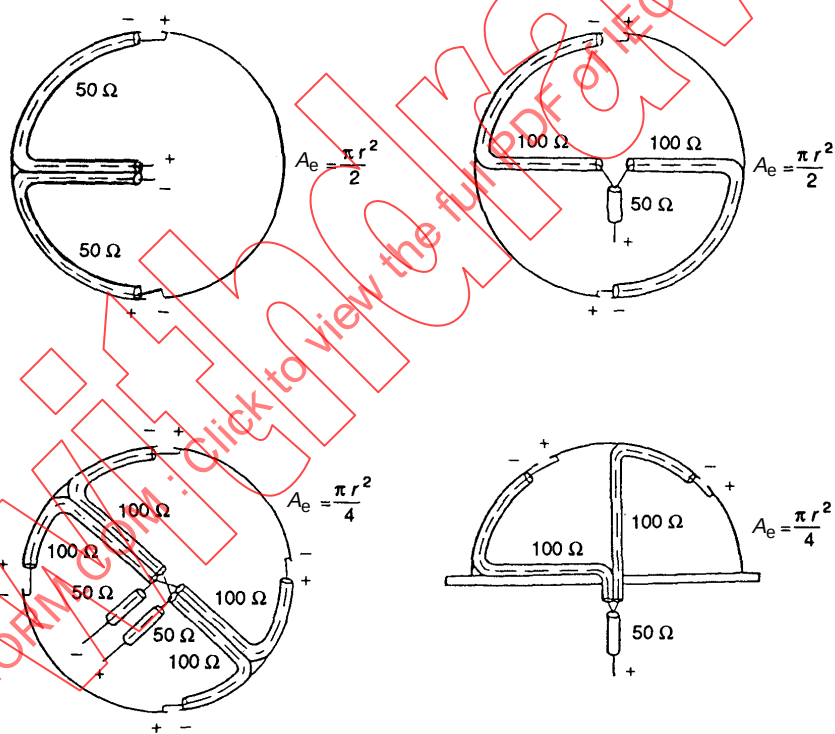
Figure C.3 – Capteurs à deux et quatre fentes, à bobine cylindrique [22]

Le facteur limitatif de base pour ce type de capteurs est leur taille, car il faut que le capteur soit électriquement petit pour fonctionner correctement dans le cadre des essais IEMN-HA. On dispose de grands capteurs (environ 0,5 m de diamètre) pour mesurer les champs B dans la gamme de 10 kHz à 30 MHz. Des capteurs plus petits (environ 10 cm de diamètre) peuvent être utilisés pour des mesures à plus haute fréquence, généralement avec une largeur de bande effective de 9 kHz à 150 MHz.



IEC 1747/2000

Figure C.2 – Single-slot, cylindrical coil sensor [22]



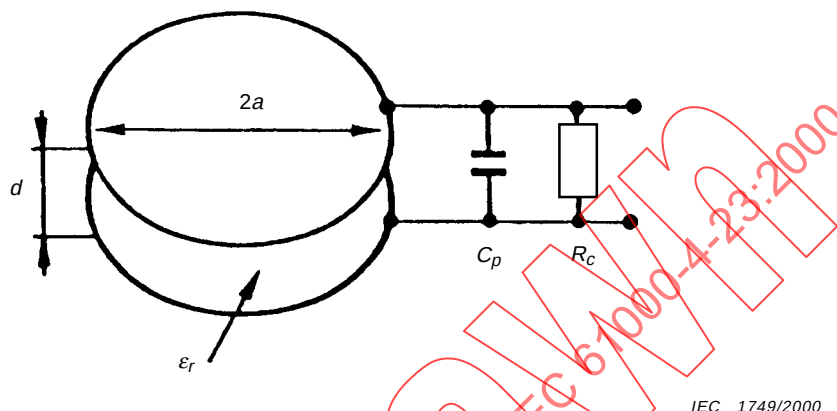
IEC 1748/2000

Figure C.3 – Two- and four-slot cylindrical coil sensors [22]

The basic limiting factor of these types of sensors is their size, since the sensor must be electrically small in order for it to function properly in HEMP tests. Large ($\sim 0,5$ m diameter) sensors are available for measuring the B -fields in a range of 10 kHz to 30 MHz. Smaller sensors (approximately 10 cm diameter) are available for higher frequency measurements, typically with an effective bandwidth of 9 kHz to 150 MHz.

C.2.2 Capteurs de champ D et E

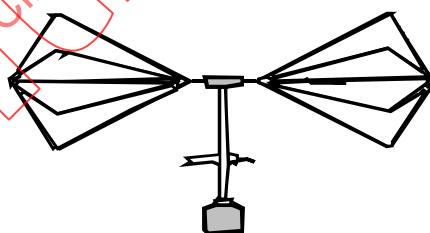
La configuration de base d'un capteur de champ E est présentée à la figure C.4. Les deux plaques, lorsqu'elles sont immergées dans un champ E à variation temporelle, produisent un courant de court-circuit proportionnel à la vitesse de variation temporelle du champ. Ce signal est souvent intégré (soit de façon passive, comme indiqué, soit par un intégrateur actif) pour fournir une indication du champ E réel.



IEC 1749/2000

Figure C.4 – Configuration électrique d'un capteur de champ E [22]

Les mesures de champ E réalisées en espace libre utilisent généralement une antenne (ou un capteur) similaire à celle illustrée à la figure C.5. Ce capteur mesure la composante du champ E parallèle à la dimension longitudinale de l'antenne. Ce type d'antenne peut être de taille relativement importante (environ 1,4 m de longueur totale), et cette taille limite la réponse maximale de l'antenne à environ 30 MHz si des courbes de calibration en fonction de la fréquence ne sont pas fournies. Cependant, si le fabricant d'antennes fournit un tel facteur de calibration permettant d'établir une correspondance entre la tension mesurée aux bornes de l'antenne et le champ E incident à une fréquence déterminée, ce type d'antennes peut être utilisé jusqu'à des fréquences d'environ 200 MHz.



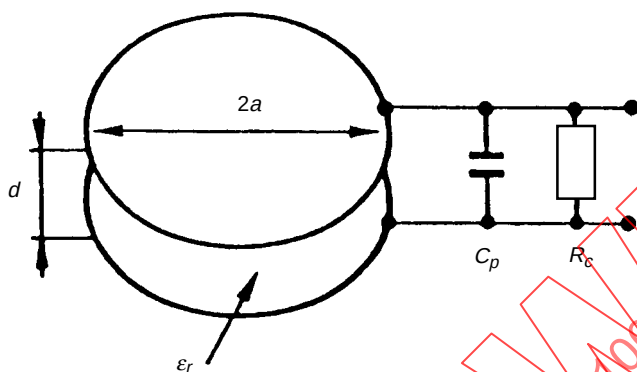
IEC 1750/2000

Figure C.5 – Capteur de champ E bicône

D'autres types de capteurs de champ E plus petits sont possibles. La figure C.6 illustre un capteur à dipôle sphérique utilisé pour mesurer le champ E sur une surface conductrice. Des capteurs plus grands de ce type présentent une fréquence maximale d'environ 45 MHz avec une capacité de mesure du temps de montée d'environ 7,4 ns. Des unités plus petites de ce type présentent une fréquence maximale de 150 MHz et un temps de montée de 2,3 ns.

C.2.2 D- and E-field sensors

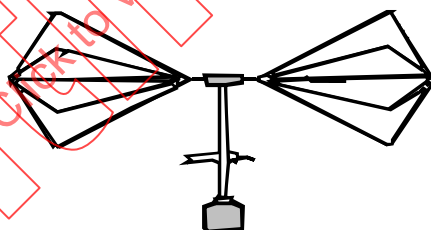
The basic configuration for an *E*-field sensor is shown in figure C.4. The two plates, when immersed in a time-varying *E*-field, produce a short-circuit current that is proportional to the time rate of change of the field. This signal is often integrated (either passively as shown, or by an active integrator) to provide an indication of the actual *E*-field.



IEC 1749/2000

Figure C.4 – Electrical configuration of an *E*-field sensor [22]

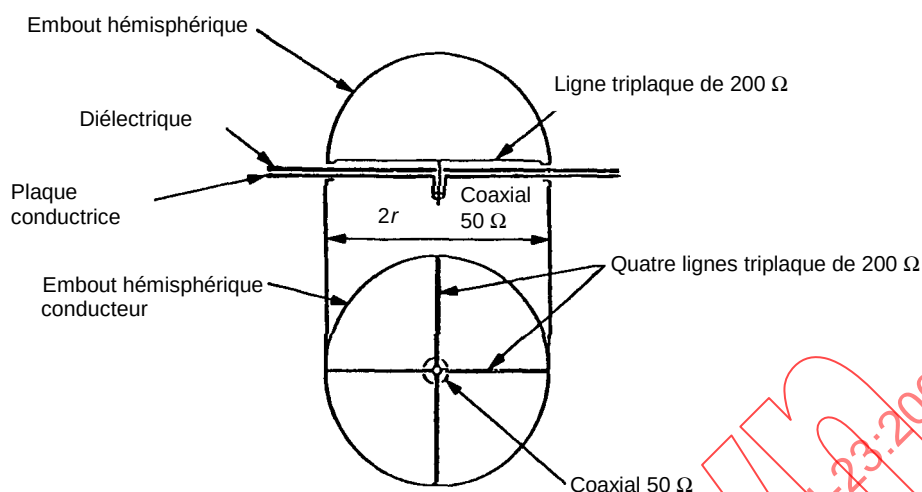
E-field measurements made in free space usually use an antenna (or sensor) similar to that illustrated in figure C.5. This sensor responds to the *E*-field component that is parallel to the long dimension of the antenna. This antenna can be relatively large (about 1,4 m in overall length) and this size limits the practical upper frequency response of the antenna to about 30 MHz, if frequency dependent calibration curves are not provided. However, in the event that the antenna manufacturer provides such a calibration factor relating the measured voltage at its terminals to the incident *E*-field at a specified frequency, this type of antenna can be used at frequencies up to about 200 MHz.



IEC 1750/2000

Figure C.5 – Biconical *E*-field sensor

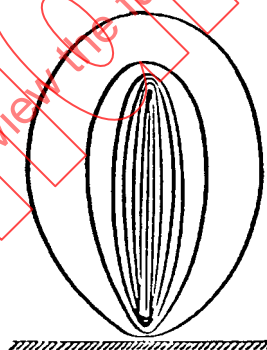
Other types of smaller *E*-field sensors are possible. Figure C.6 illustrates a spherical dipole sensor which is used to measure the *E*-field on a conducting surface. Larger sensors of this type have a maximum frequency of about 45 MHz with a rise-time measurement capability of about 7,4 ns. Smaller units of this type have a maximum frequency of 150 MHz and a rise time of 2,3 ns.



IEC 1751/2000

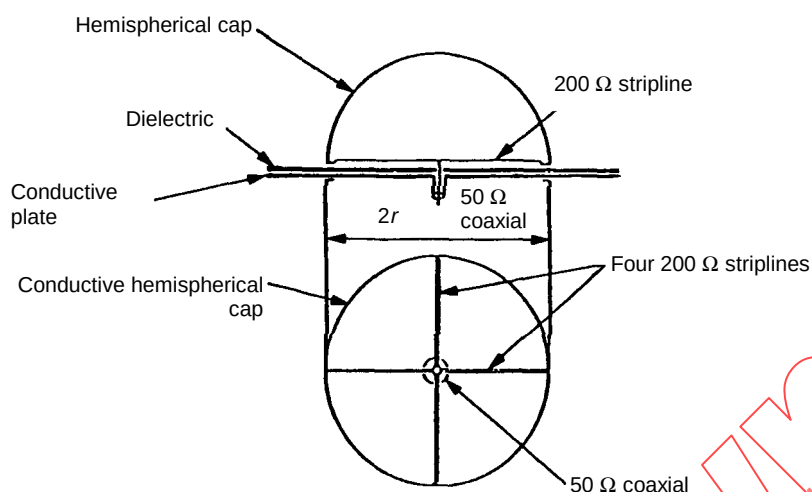
Figure C.6 – Capteur de champ E monté sur un plan de masse conducteur [22]

D'autres types de capteurs de champ E présentent des formes de section transversale assez particulières, comme illustré à la figure C.7. Il s'agit du capteur à dipôle conique asymptotique (ACD) conçu pour fournir une réponse connue par une simple mesure d'un facteur géométrique. Cet «étalonnage à la règle» est possible uniquement pour un nombre limité de formes d'antenne.



IEC 1752/2000

Figure C.7 – Formes équipotentiellles d'un capteur de champ E de conception optimale [22]



IEC 1751/2000

Figure C.6 – *E*-field sensor mounted on a conducting ground plane [22]

Other types of *E*-field sensors have rather odd cross-sectional shapes, as shown in figure C.7. This is the asymptotic conical dipole (ACD) sensor which is designed to provide a known response by simply measuring some geometrical factor. This is known as "calibration by the ruler" and is only possible for a limited number of antenna shapes.

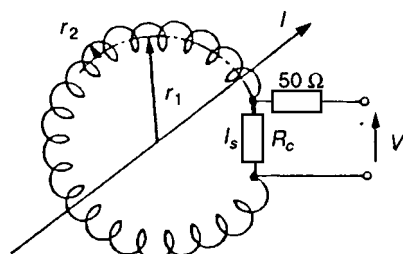


IEC 1752/2000

Figure C.7 – Equipotential shapes for an optimally designed *E*-field sensor [22]

C.2.3 Sondes de courant

Les sondes (ou capteurs) de courant sont essentiellement de petits transformateurs fixés sur un câble transportant un courant et produisent une tension proportionnelle au courant circulant dans le câble. Le fonctionnement de ces dispositifs est similaire à celui d'une bobine Rogowski, représentée à la figure C.8.

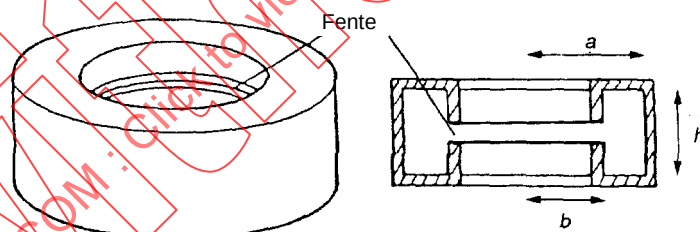


IEC 1753/2000

Figure C.8 – Bobine Rogowski utilisée pour les mesures de courant [22]

Généralement, ces bobines comportent une boucle monotour réalisée dans un matériau de forte permittivité afin d'augmenter la sensibilité de mesure. La figure C.9 illustre cette configuration, dans laquelle une tension est induite au niveau de la fente dans le tore de μ élevé par le courant dans un fil traversant le trou de la sonde.

Les sondes utilisant des points d'appel de tension multiples, comme indiqué à la figure C.10, constituent des exemples typiques de ces dispositifs. Les versions grand format de ces sondes ont une largeur de bande de 100 kHz à 100 MHz. Les versions plus réduites de ces sondes sont du type «à pince» et peuvent généralement fonctionner de 200 kHz à 300 MHz.

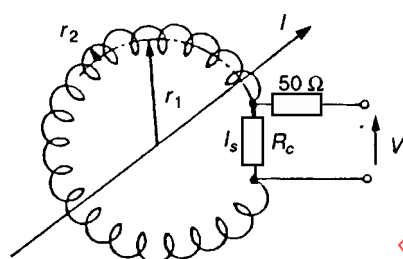


IEC 1754/2000

Figure C.9 – Sonde de courant torique réalisée dans un matériau magnétique [22]

C.2.3 Current sensors

Current sensors (or probes) are essentially small transformers which are clamped over a cable carrying a current and provide a voltage which is proportional to the current flowing through the cable. The operation of these devices is similar to that of a Rogowski coil, as pictured in figure C.8.

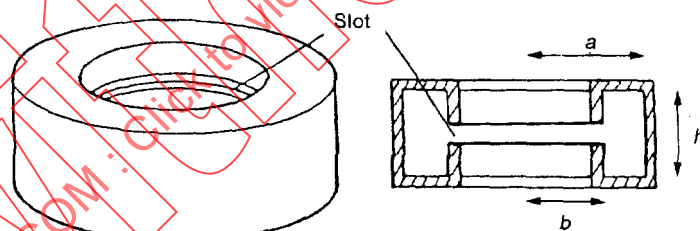


IEC 1753/2000

Figure C.8 – The Rogowski coil used for current measurements [22]

Usually, these coils are made of a single-turn loop of high permeability material to increase the measurement sensitivity. Figure C.9 illustrates this configuration, in which a voltage is induced across the slot in the high permeability toroid by the current in a wire passing through the hole in the sensor.

Typical realizations of these devices are the probes which use multiple voltage pick-up points as shown in figure C.10. Large versions of these probes have a bandwidth of 100 kHz to 100 MHz. The smaller versions of these probes are of the "clip-on" type and can operate typically from 200 kHz to 300 MHz.



IEC 1754/2000

Figure C.9 – Toroidal current sensor made of magnetic material [22]

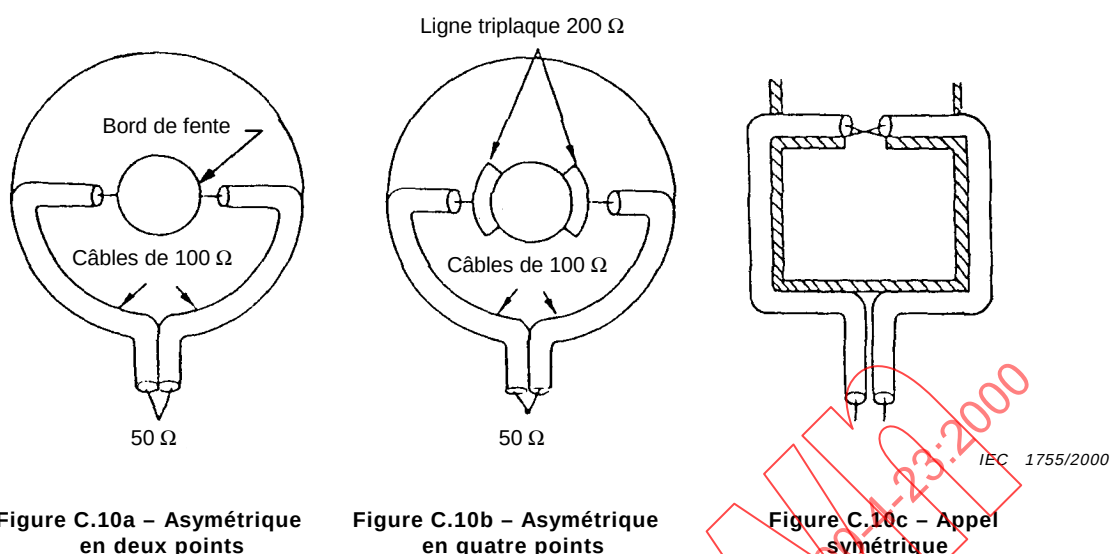


Figure C.10a – Asymétrique en deux points

Figure C.10b – Asymétrique en quatre points

Figure C.10c – Appel symétrique

Figure C.10 – Points d'appel de tension sur les bords de la sonde torique [22]

C.3 Transmission de signal

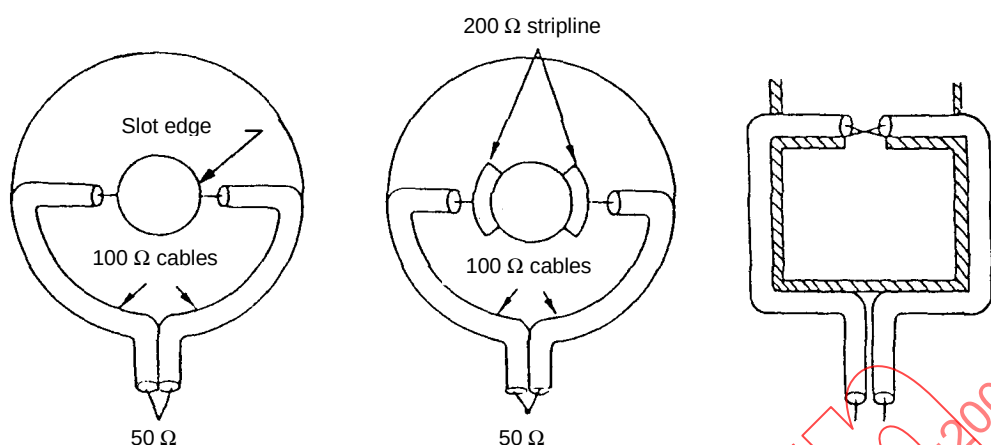
Il faut que les réponses mesurées à partir des capteurs soient relayées entre le capteur et le matériel de mesure. La technique recommandée pour ce faire consiste à employer des liaisons par fibres optiques, car elles exercent une influence minimale sur l'environnement EM entourant le matériel d'essai.

C.3.1 Liaisons par fibre optique

De nombreuses méthodes différentes sont utilisées pour transmettre des informations dans les essais IEMN-HA: par exemple les fils, les câbles coaxiaux, les guides d'onde et la radio. Pour une transmission de signal de qualité supérieure, il convient d'utiliser des connexions électriques câblées entre les capteurs et les numériseurs transitoires. Cependant, ces câbles peuvent également collecter une partie du signal IEMN-HA et corrompre les réponses des capteurs. De plus, la présence de câbles électriques longs à l'intérieur d'une installation peut déformer les champs EM normaux et peut même introduire un trajet de couplage EM par inadvertance.

Le poids est l'un des principaux inconvénients des câbles coaxiaux: les câbles RG14 et RG19 pèsent respectivement 350 kg/km et 1 100 kg/km: un câble monofibre type pèse seulement 12 kg/km. Cette différence peut devenir beaucoup plus importante dans les câbles multivoie. L'immunité au bruit représente également un problème pour les câbles coaxiaux. Ils sont sensibles aux champs électriques et magnétiques générés par les machines, l'éclairage ou les IEMN-HA. Les boucles de masse et les oscillations présentent également de graves problèmes potentiels dans les systèmes de câbles coaxiaux.

En raison de ces difficultés, l'utilisation de liaisons par fibres optiques est souvent recommandée pour les essais IEMN-HA. L'utilisation de ces liaisons élimine les problèmes de filtrage et de mise à la masse, et réduit à quelques millimètres les tailles d'ouverture pour les connecteurs traversant dans la structure du blindage. Autre avantage: les fibres ne présentent presque aucune interférence; même si la lumière est rayonnée par une fibre, elle ne peut pas être récupérée par d'autres fibres.



IEC 1755/2000

Figure C.10a – Unbalanced at two points

Figure C.10b – Unbalanced at four points

Figure C.10c – Balanced pick-up

Figure C.10 – Voltage pick-up points on the edges of the toroidal sensor [22]

C.3 Signal transmission

Measured responses from the sensors must be relayed from the sensor to the measurement equipment. The preferred technique for doing this is to employ fibre optic links, because they have a minimal influence on the EM environment surrounding the test equipment.

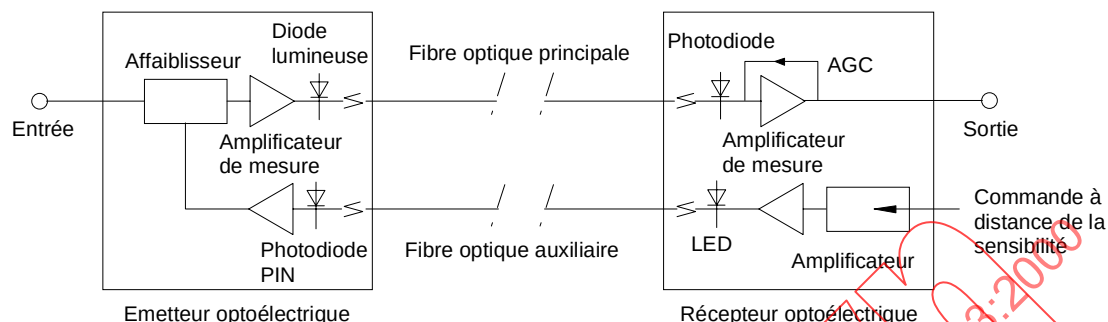
C.3.1 Fibre optic links

Many different methods are used to transmit information in HEMP tests, e.g. wires, coaxial cables, waveguides and radio. For the highest quality signal transmission, hard-wired electrical connections from the sensors to the transient digitizers should be used. However, such wires can also pick up part of the HEMP signal and corrupt the responses of the sensors. Furthermore, the presence of long electrical cables inside a facility can distort the normal EM fields and may even introduce an inadvertent EM coupling path.

Weight is one of the main disadvantages of coaxial cables: the RG14 and RG19 cables weigh 350 kg/km and 1 100 kg/km respectively: a typical single-fibre cable weighs only 12 kg/km. This difference may become much more drastic in multichannel cables. Noise immunity is also a problem in coaxial cables. They are sensitive to the electric and magnetic fields generated by machinery, lightning or EMP. Ground loops and oscillations are also severe potential problems in coaxial cable systems.

As a result of these difficulties, the use of fibre optic links is often recommended for HEMP testing. The use of such links eliminates filtering and grounding problems, and minimizes to a few millimetres the aperture sizes for pass-through connectors in the shielding structure. An additional benefit is that the fibres are practically free from crosstalk: even if light is radiated by one fibre, it cannot be recaptured by other fibres.

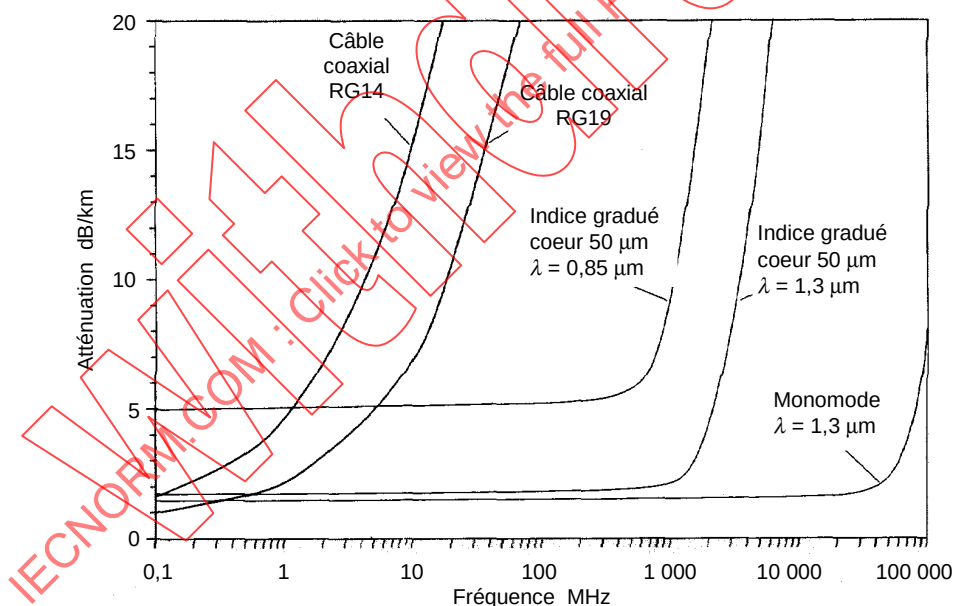
La figure C.11 illustre un système de transmission par fibres optiques monovoie. Généralement, il existe en réalité deux voies: l'une pour la transmission du signal et l'autre pour la commande des réglages d'un atténuateur de signal situé dans l'unité de l'émetteur, à proximité des capteurs.



IEC 1756/2000

Figure C.11 – Exemple de système de transmission à fibres optiques monovoie [22]

La figure C.12 compare les caractéristiques d'atténuation et de largeur de bande de deux câbles de type RG avec celles de fibres typiques. L'effet de peau dans un câble coaxial provoque une augmentation de l'atténuation en fonction de la racine carrée de la fréquence, débutant généralement en dessous de 1 MHz. Par conséquent, pour des lignes coaxiales très longues, des effets de dispersion importants apparaissent, qu'il faut corriger par des filtres.



IEC 1757/2000

Figure C.12 – Atténuation de lignes coaxiales et de câbles à fibres optiques en fonction de la fréquence

C.3.2 Transducteurs à fibres optiques

Il faut que les transducteurs soient situés à chaque extrémité du câble à fibres optiques pour convertir les signaux électriques en faisceaux lumineux modulés, puis reconvertir la lumière en signaux électriques. Ces unités peuvent prendre plusieurs formes, mais les unités les plus modernes comprennent un contrôleur à microprocesseur et un système de bus interne abritant, alimentant et commandant différents modules. Cela permet d'adapter le système à des applications spécifiques.

Figure C.11 illustrates a single-channel fibre optic transmission system. Typically, there are actually two fibre channels: one for transmitting the signal, and another for controlling the settings of a signal attenuator located in the transmitter unit near the sensors.

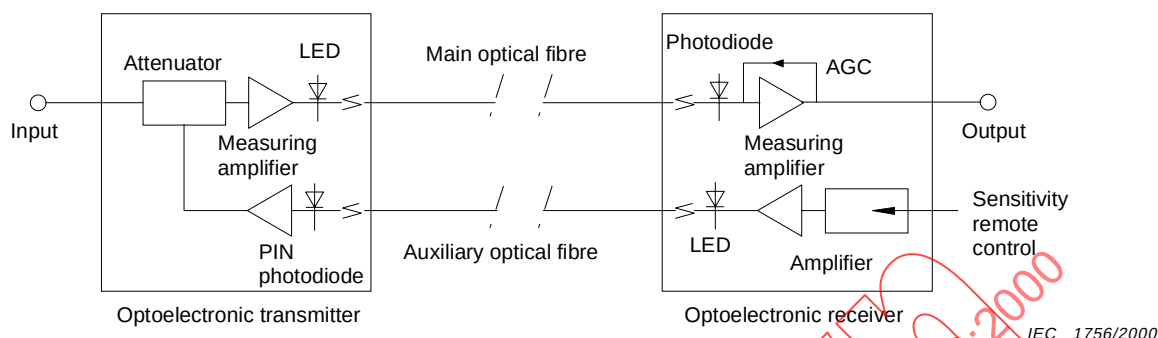


Figure C.11 – Example of a single-channel fibre optic transmission system [22]

Figure C.12 compares the attenuation and bandwidth characteristics of two RG type cables with those of typical fibres. The skin effect in a coaxial cable causes the attenuation to rise with the square root of the frequency, typically starting below 1 MHz. As a result, for very long coaxial lines, serious dispersion effects arise which must be corrected with filters.

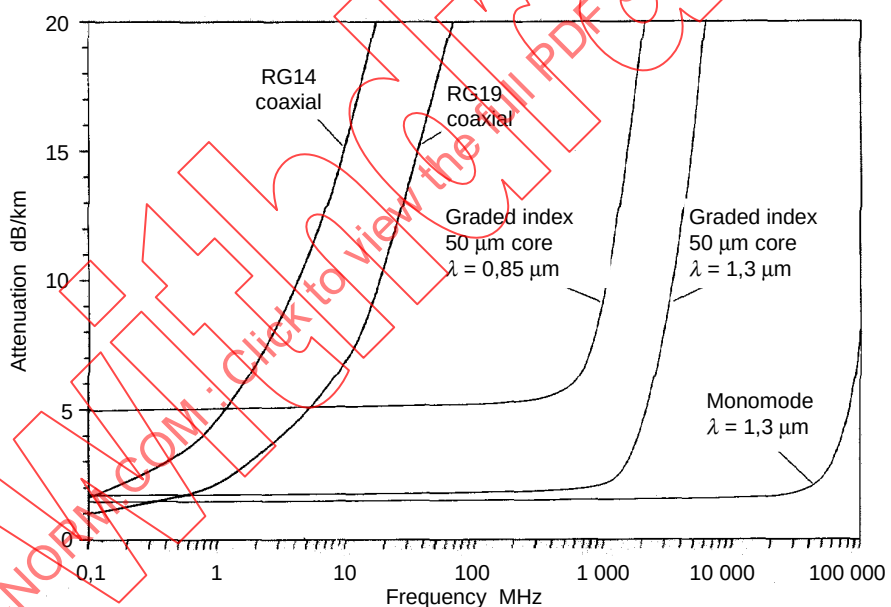


Figure C.12 – Attenuation of coaxial lines and fibre optic cables as a function of frequency

C.3.2 Fibre optic transducers

Transducers must be located at each end of the fibre optic cable to convert the electrical signals to modulated light beams, and to then convert the light back to electrical signals. Such units can take many forms, but the more modern units consist of a microprocessor controller and internal bus system which can house, power and control different modules. This permits the system to be tailored for specific applications.

Un système enfichable typique comprend un module de base s'adaptant à l'unité principale, un câble à fibres optiques pour les signaux, un câble à fibres optiques pour la commande, si nécessaire, un ou deux modules blindés (champs électromagnétiques supérieurs à 200 V/m à ondes non modulées et 100 kV/m à impulsions) de petite taille et alimentés par batterie, ainsi qu'un ou deux chargeurs de batterie. Chaque fiche peut être gérée individuellement par le système de commande à microprocesseur dans le processeur central. La plupart des modules sont contrôlables à distance via une liaison optique de commande spéciale. Ces modules sont alimentés par des batteries qui assurent un fonctionnement de plus de 8 h en continu. La longueur de la liaison optique maximale pour les modèles standards est de 1 km.

Il existe une vaste gamme de fiches à fibres optiques, fournissant une large sélection de modes de travail (acquisition, télémétrie, stimulation, surveillance de champ EM, transmissions audio et vidéo), gammes de fréquences (du c.c. jusqu'à 1 GHz) et une atténuation de gain variable.

C.4 Détection et traitement de signal

Le signal détecté à partir du transducteur à fibres optiques est numérisé, traité puis archivé. Un certain nombre de numériseurs transitoires différents sont actuellement disponibles sur le marché. Il convient que le numériseur sélectionné puisse mesurer le front de la forme d'onde EIMN-HA la plus rapide à mesurer. Généralement, les prescriptions de temps de montée sont de l'ordre de 1 ns. De plus, il convient que le numériseur possède une gamme dynamique adéquate (nombre de bits dans la représentation des données numérisées) de façon à éviter les erreurs de numérisation des réponses. Finalement, il convient que le numériseur possède une mémoire suffisante pour mesurer la réponse transitoire complète, du début à la fin, sans que des numériseurs multiples doivent échantillonner des parties différentes de la même forme d'onde.

Les capacités actuelles des ordinateurs personnels rendent inutile l'utilisation d'ordinateurs plus anciens, plus grands et plus lents, traditionnellement utilisés pour l'acquisition et l'analyse de données, pour les essais d'impulsion et d'ondes non modulées. De même, les traitements de données initiaux (traçage et correction) des données brutes et l'analyse d'extrapolation suivante peuvent être réalisés sur un PC en utilisant des programmes de traitement de signal normalisés.

A typical plug-in system consists of a base module fitting into the main unit, a fibre optic cable for signals, a fibre optic cable for control if necessary, one or two battery-powered, small-sized, shielded (more than 200 V/m CW and 100 kV/m pulsed electromagnetic fields) modules and one or two battery chargers. Each plug-in can be individually managed by the microprocessor control system inside the mainframe. Most modules are remotely controllable via a dedicated control optic link. These modules are powered by batteries which provide more than 8 h continuous operation. The maximum optic link length for standard models is 1 km.

A wide range of fibre optic plug-ins is available, providing a large selection of working modes (acquisition, telemetry, stimulation, EM field monitoring, audio and video transmissions), frequency ranges (from d.c. up to 1 GHz) and variable gain attenuation.

C.4 Signal detection and processing

The detected signal from the fibre optic transducer is digitized, processed and then archived. A number of different transient digitizers are currently available on the market. The one selected should be capable of measuring the leading edge of the fastest HEMP waveform that is to be measured. Typical rise-time requirements will be of the order of 1 ns. Furthermore, the digitizer should have an adequate dynamic range (number of bits in the representation of the digitized data) so as to avoid the digitization errors in the responses. Finally, the digitizer should have sufficient memory to be capable of measuring the complete transient response, from start to finish, without the requirement of having multiple digitizers sampling different portions of the same waveform.

Present-day capabilities of personal computers make it unnecessary to use the older, larger and slower computers that have traditionally been used for data acquisition and analysis purposes, both for pulse and CW testing. Similarly, the initial data processing (plotting and correcting) of the raw data and the subsequent extrapolation analysis can be performed on a PC using standard signal processing programs.

Annexe D (informative)

Matériel d'essai à ondes non modulées

D.1 Introduction

La présente annexe étudie le matériel et les techniques d'étalonnage nécessaires pour réaliser un essai à ondes non modulées. Une partie du matériel, telle que les capteurs de champ et les liaisons par fibre optique, est identique au matériel utilisé pour les essais transitoires. Cependant, d'autres éléments tels que l'analyseur de réseau à ondes non modulées et les antennes rayonnantes sont différents.

D.2 Le système d'antenne

Plusieurs types différents d'antenne rayonnante sont possibles, en fonction des polarisations souhaitées et de la gamme de fréquences de fonctionnement. Pour des fréquences comprises entre approximativement 1 MHz et 100 MHz, l'antenne présentée à la figure D.1a rayonne un champ E dans la direction transversale par rapport à l'antenne, polarisée principalement à l'horizontale. Pour des fréquences inférieures, l'efficacité de rayonnement diminue et, à la fréquence maximale, le champ de rayonnement inclut des lobes secondaires en raison de la taille électrique importante de l'antenne.

L'antenne est reliée à la terre aux deux extrémités, au travers d'une résistance de l'ordre de 400 Ω à 500 Ω . Cette liaison électrique sert à renforcer les caractéristiques de rayonnement à basse fréquence de l'antenne. L'antenne est alimentée à son sommet par un amplificateur de puissance relié via un câble coaxial. Il faut que cette ligne non équilibrée soit adaptée à l'entrée de l'antenne équilibrée au niveau du sommet du pylône de support du diélectrique par un transformateur d'équilibrage, appelé symétriseur d'antenne. Il faut veiller à ce que, durant les essais, le niveau de puissance de l'amplificateur ne dépasse pas le niveau de puissance de fonctionnement assigné du symétriseur d'antenne.

Si l'on souhaite un champ E incident vertical, on peut utiliser une antenne verticale, comme l'illustre la figure D.1b. Un conducteur vertical est alimenté par une source de tension entre la base de l'antenne et le sol, produisant un champ E à polarisateur vertical. A basse fréquence (c'est-à-dire pour des fréquences telles que $\lambda >$ longueur d'antenne), le rayonnement de ce type d'antenne est très faible.

La figure D.1c illustre un autre type d'antenne rayonnante, connue comme l'antenne $P \times M$. Elle apparaît comme une simple ligne de transmission alimentée à une extrémité, présentant une charge, au niveau de cette extrémité, égale à l'impédance caractéristique de la ligne. Cette ligne présente la propriété utile de rayonner un champ EM possédant une impédance caractéristique d'exactement 377 Ω – même à de très basses fréquences. Ce rayonnement se produit dans le sens «arrière», c'est-à-dire à droite de la source dans la figure D.1c. Cependant, cette antenne est efficace de cette façon uniquement pour de basses fréquences. Quand la fréquence commence à augmenter de façon que $\lambda >$ la longueur de ligne, le faisceau du rayonnement commence à se déplacer vers l'avant et l'antenne devient la fameuse antenne Beverage.

Pour les antennes horizontales et verticales, il est important d'ajouter une charge résistive le long des câbles. Cette résistance sert à amortir les résonances d'antenne naturelles, créant ainsi un spectre de champ rayonné plus lisse. De plus, en choisissant correctement le niveau d'impédance de charge sur l'antenne, le rapport E/H des champs à proximité de l'antenne peut être plus proche de celui d'une onde plane en espace libre, c'est-à-dire 377 Ω .