

**RAPPORT  
TECHNIQUE**

**CEI  
IEC**

**TECHNICAL  
REPORT**

**1000-5-4**

Première édition  
First edition  
1996-08

---

---

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –**

**Partie 5:**

**Guide d'installation et d'atténuation –**

**Section 4: Immunité à l'IEM-HA –**

**Spécifications des dispositifs de protection  
contre les perturbations rayonnées IEM-HA –**

**Publication fondamentale en CEM**

**Electromagnetic compatibility (EMC) –**

**Part 5:**

**Installation and mitigation guidelines –**

**Section 4: Immunity to HEMP –**

**Specifications for protective devices against  
HEMP radiated disturbance –**

**Basic EMC publication**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 1000-5-4: 1996

## Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**  
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

## Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*, qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

## Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**  
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates

## Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*, which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**RAPPORT  
TECHNIQUE – TYPE 2**

**CEI  
IEC**

**1000-5-4**

**TECHNICAL  
REPORT – TYPE 2**

Première édition  
First edition  
1996-08

---

---

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –**

**Partie 5:**

**Guide d'installation et d'atténuation –**

**Section 4: Immunité à l'IEM-HA –**

**Spécifications des dispositifs de protection  
contre les perturbations rayonnées IEM-HA –**

**Publication fondamentale en CEM**

**Electromagnetic compatibility (EMC) –**

**Part 5:**

**Installation and mitigation guidelines –**

**Section 4: Immunity to HEMP –**

**Specifications for protective devices against  
HEMP radiated disturbance –**

**Basic EMC publication**

© CEI 1996 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

Bureau central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève Suisse



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**U**

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

## SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS .....	4
Articles	
1 Domaine d'application .....	8
2 Référence normative .....	8
3 Définitions .....	8
4 Spécifications des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées .....	10
4.1 Classification générale des dispositifs de blindage .....	12
4.2 Exigences générales .....	12
4.3 Spécifications .....	14
4.3.1 Généralités .....	14
4.3.2 Matériaux de barrière .....	14
4.3.3 Câbles et conduits blindés .....	28
4.3.4 Matériaux de jointoiment .....	36
4.3.5 Composants de blindage .....	38
Annexes	
A Théorie générale .....	40
B Bibliographie .....	54

## CONTENTS

	Page
FOREWORD .....	5
Clause	
1 Scope .....	9
2 Normative reference.....	9
3 Definitions.....	9
4 Specifications for protective devices against radiated disturbances .....	11
4.1 General classification for shielding devices .....	13
4.2 General requirements .....	13
4.3 Specifications .....	15
4.3.1 General .....	15
4.3.2 Barrier materials .....	15
4.3.3 Shielded cables and conduits .....	29
4.3.4 Gasketing materials .....	37
4.3.5 Shielding components .....	39
Annexes	
A General theory.....	41
B Bibliography.....	54

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) – Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation – Section 4: Immunité à l'IEM-HA – Spécifications des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées IEM-HA – Publication fondamentale en CEM

#### AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique 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 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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles 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 du 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) 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.
- 6) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand il est déclaré qu'un matériel est conforme à l'une de ses normes.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de type 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

La CEI 1000-5-4, rapport technique de type 2, a été établie par le sous-comité 77C: Immunité à l'impulsion électromagnétique nucléaire à haute altitude (HEMP), du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –**  
**Part 5: Installation and mitigation guidelines**  
**Section 4: Immunity to HEMP – Specifications for protective devices**  
**against HEMP radiated disturbance –**  
**Basic EMC publication**

## 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 cooperation 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, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, 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) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.
- 6) The IEC has not laid down any procedure concerning marking as an indication of approval and has no responsibility when an item of equipment is declared to comply with one of its standards.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 1000-5-4, which is a technical report of type 2, has been prepared by subcommittee 77C: Immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP), of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
77C/26/CDV	77C/36/RVC

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

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.4.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine de la compatibilité électromagnétique car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «Norme internationale». Il est proposé pour une mise en oeuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

The text of this this technical report is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
77C/26/CDV	77C/36/RVC

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

This document is issued in the type 2 Technical Report series of publications (according to G.4.2.2 of part 1 of the IEC/ISO Directives as a "prospective standard for provisional application" in the field of electromagnetic compatibility because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an "International Standard". It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of this type 2 Technical Report will be carried out not later than three years after its publication, with the options of either extension for a further three years or conversion to an International Standard or withdrawal.

Annexes A and B are for information only.

**COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –**  
**Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation –**  
**Section 4: Immunité à l'IEM-HA – Spécifications des dispositifs**  
**de protection contre les perturbations rayonnées IEM-HA –**  
**Publication fondamentale en CEM**

## 1 Domaine d'application

Le présent rapport technique définit comment les dispositifs de protection utilisés pour la protection des systèmes civils vis-à-vis de l'impulsion électromagnétique nucléaire à haute altitude (IEM-HA) sont spécifiés. Les performances requises seront données dans d'autres documents de la CEI. Son utilisation est prévue pour l'harmonisation des spécifications existantes et futures fournies par les fabricants de dispositifs de protection, d'équipements électroniques, les administrations et les acheteurs finaux.

Ce rapport technique couvre les dispositifs de protection couramment utilisés pour la protection contre les champs électromagnétiques rayonnés au cours d'une IEM-HA. En général, les paramètres IEM-HA appropriés, c'est-à-dire ceux qui sont relatifs à des changements très rapides de champs EM dans le domaine du temps, sont traités.

## 2 Référence normative

Le document normatif suivant contient des dispositions, qui par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour ce rapport technique. Au moment de la publication, l'édition indiquée était en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision, et les parties prenantes aux accords fondés sur le présent rapport technique sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes du document normatif indiqué ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

VEI 50(161) 1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

## 3 Définitions

Pour les besoins du présent rapport technique, les définitions suivantes s'appliquent.

**IEM-HA/IEMN-HA:** Les deux acronymes sont équivalents et acceptés pour Impulsion Electromagnétique Nucléaire à Haute Altitude. Le terme IEM-HA est préférable à IEMN-HA.

**barrière:** Séparation utilisée pour l'isolation de circuits électriques vis-à-vis des perturbations électromagnétiques. (Un blindage est un type particulier de barrière.)

**résistance de contact:** Résistance mesurée en ohms entre deux objets en contact l'un avec l'autre.

**taux de compression:** Pourcentage de réduction permanente de la dimension d'un matériau due à la compression dans des conditions spécifiques de chaleur, pression et durée.

**résistance à la corrosion:** Résistance à une action chimique qui entraîne une destruction graduelle de la surface du métal par oxydation, électrolyse ou contamination chimique.

**fréquence de coupure:** Fréquence pour laquelle le module d'une grandeur caractéristique mesurée a décru jusqu'à une fraction spécifiée de sa valeur aux basses fréquences.

NOTE – Pour un guide d'ondes, c'est la fréquence en-dessous de laquelle l'énergie électromagnétique n'est pas propagée efficacement dans le guide. Cette fréquence dépend de la géométrie de la section transversale et des dimensions du guide.

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –**  
**Part 5: Installation and mitigation guidelines**  
**Section 4: Immunity to HEMP – Specifications for protective devices**  
**against HEMP radiated disturbance –**  
**Basic EMC publication**

## 1 Scope

This technical report defines how protective devices for High Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse (HEMP) protection of civilian systems are specified. Performance requirements will be given in future IEC standards. This technical report is intended to be used for the harmonization of existing or future specifications issued by protective devices manufacturers, electronic equipment manufacturers, administrative bodies and other buyers.

This technical report covers protective devices currently used for protection against HEMP radiated EM fields. In general, parameters relevant to HEMP, that is parameters related to very fast changes of EM fields, as a function of time, are dealt with.

## 2 Normative reference

The following normative document contains provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this technical report. At the time of publication, the edition indicated was valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this technical report are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent edition of the normative document indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(161): 1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

## 3 Definitions

For the purpose of this technical report, the following definitions apply.

**HEMP/HA-NEMP:** The two acronyms are equivalent and accepted for High Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse. HEMP is preferable to HA-NEMP.

**barrier:** Separation used to insulate electrical circuits from electromagnetic disturbances. (A shield is a special type of barrier.)

**contact resistance:** Resistance measured in ohms between two objects in contact with each other.

**compression set:** The per cent of permanent height reduction in a material caused by compression under specific conditions of heat, pressure and time.

**corrosion resistance:** Resistance to a chemical action which causes gradual destruction of the surface of a metal by oxidation, electrolysis or chemical contamination.

**cut-off frequency:** The frequency at which the magnitude of a measured characteristic quantity has decreased to a specified fraction of its low-frequency value.

NOTE – For a waveguide it is the frequency below which electromagnetic energy is not efficiently propagated in the guide. This frequency depends on the cross-section geometry and dimensions of the guide.

**étirement:** Augmentation de longueur d'un matériau contraint en tension.

**plaque collectrice:** Endroit physique à la surface d'une enceinte fermée par lequel l'énergie pénètre à l'intérieur.

**dispositif de protection:** Composant électrique, tel que filtre, éclateur à gaz, varistance à oxyde métallique, etc, pour la protection contre les perturbations conduites, ou blindage, joint, guide d'ondes, etc., pour la protection contre les perturbations rayonnées. Un tel élément ou une combinaison de plusieurs d'entre eux constitue alors une partie du concept de barrière électromagnétique d'un système.

**blindage:** Matériau électriquement conducteur placé autour d'un circuit, d'un composant ou d'un câble pour supprimer l'effet d'un champ électromagnétique à l'intérieur ou au-delà des régions ainsi délimitées.

**efficacité de blindage:** Mesure, généralement exprimée en dB, de la réduction ou de l'atténuation de l'amplitude d'un champ électromagnétique en un point de l'espace avant et après la mise en place d'un blindage, entre une source et ce point.

**épaisseur de peau:** Epaisseur de matériau conducteur à partir de laquelle la densité de courant diminue d'un Néper ( $1/e$  ou 36,8%) par rapport à sa valeur à la surface du matériau.

**résistivité de surface:** Résistance d'un matériau mesurée entre deux côtés opposés d'une surface carrée unité, exprimée généralement en ohms par carré.

**impédance linéique de transfert** (d'une ligne coaxiale): Quotient de la tension induite par unité de longueur, dans le conducteur central d'une ligne coaxiale, par le courant dans le conducteur extérieur. [VEI 161-04-15]

**force de tension:** Force maximale appliquée à un échantillon lorsqu'on l'étire jusqu'à le rompre.

**admittance de transfert:** Relation mathématique entre le courant induit sur un conducteur situé du côté protégé d'une région blindée et la tension du côté exposé de l'enceinte. C'est la quantité duale de l'impédance de transfert.

**impédance de transfert** (d'un circuit sous écran): Quotient de la tension entre deux points spécifiés d'un circuit sous écran par le courant dans une section droite déterminée de l'écran. [VEI 161-04-14]

**résistivité volumique:** Résistance électrique d'un matériau mesurée entre deux faces opposées d'un volume de  $1 \text{ cm}^3$  exprimée généralement en ohms.centimètres.

**guide d'ondes sous la coupure:** Dispositif de protection consistant en une longueur de guide d'ondes qui limite le passage de l'énergie électromagnétique en dessous d'une fréquence définie.

**guide d'ondes (trappe):** Guide d'ondes en dessous de la coupure servant de protection électromagnétique dans une barrière.

#### 4 Spécifications des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées

L'efficacité de blindage d'une enceinte blindée (cage de Faraday, coffret ou bâtiment blindé) est dégradée par les pénétrations, ouvertures et joints. Ils doivent être traités de telle manière que la dégradation de l'efficacité de blindage qu'ils occasionnent soit la plus faible possible. Cet objectif est atteint grâce à des dispositifs de protection appropriés.

Dans ce qui suit, ces dispositifs de protection sont traités un à un, en expliquant leur principe de fonctionnement, en montrant dans certains cas leurs limites d'utilisation, et enfin en listant les spécifications devant être fournies par les fabricants.

**elongation:** The increase in length of a material stressed under tension.

**point of entry:** The physical place at the surface of a closed enclosure through which the energy penetrates.

**protective device:** An electrical component such as a filter, gas discharge tube, metal oxide varistor, etc., for protection against conducted disturbances, or a shield, gasket, waveguide trap, etc., for protection against radiated disturbances. Such an element, or a combination of several of them, thus forms part of the conceptual electromagnetic barrier of the system.

**shield:** Electrically conductive material placed around a system circuit, component, or cable to suppress the effect of an electromagnetic field within or beyond definite regions.

**shielding effectiveness:** The measure, generally in dB, of the reduction or attenuation of the amplitude of an electromagnetic field at a point in space before and after the placement of a shield, between a source and this point.

**skin depth:** The depth of a conductive material beyond which the current density has decreased by one Neper ( $1/e$  or 36,8 %) in comparison with its value at the surface of the material.

**surface resistivity:** The resistance of a material between two opposite sides of a unit square of its surface, commonly expressed in ohms per square.

**surface transfer impedance (of a coaxial line):** The quotient of the voltage induced in the centre conductor of a coaxial line per unit length by the current on the external surface of the coaxial line. [IEV 161-04-15]

**tensile strength:** The maximum tensile stress applied, during stretching, to a specimen to rupture.

**transfer admittance:** A mathematical relationship between the induced current on a conductor located on the protected side of a shielded region and the voltage on the unprotected side of the enclosure. This is the dual quantity of the transfer impedance.

**transfer impedance (of a screened circuit):** The quotient of the voltage appearing between two specified points in the screened circuit by the current in a defined cross-section of the screen. [IEV 161-04-14]

**volume resistivity:** The electrical resistance between opposite faces of  $1 \text{ cm}^3$  of material, commonly expressed in ohms.centimetres.

**waveguide below cut-off:** A protective element consisting of a length of waveguide which limits the passage of electromagnetic energy below a fixed frequency.

**waveguide trap:** A waveguide below cut-off serving as an electromagnetic protection device in a barrier.

#### 4 Specifications for protective devices against radiated disturbances

The shielding effectiveness of a shielded enclosure (Faraday cage, cabinet or shielded building) is violated by penetrations, openings and seams. All of these shall be treated in such a way that the resulting degradation of the shielding effectiveness is as small as possible. This goal is achieved by means of specific protection devices.

In the following, these protection devices are dealt with one by one, by explaining their principles of operation, showing their limitations in some cases, and finally listing the specifications that shall be given by the manufacturers.

Les figures aident à démontrer le principe de fonctionnement et peuvent servir aussi d'exemples montrant comment les paramètres qui dépendent de la fréquence peuvent être présentés.

#### 4.1 *Classification générale des dispositifs de blindage*

Matériaux de barrière:

- matériaux de blindage;
- fenêtres de visualisation;
- panneaux d'aération;
- guides d'ondes;
- revêtements conducteurs;
- adhésifs conducteurs et joints étanches.

Câbles et conduits blindés:

- blindages en une seule pièce;
- blindages à fuites;
- connecteurs.

Matériaux de jointoiement:

- joints à fils tricotés;
- joints d'écrans et fibres métalliques;
- joints à fils orientés;
- joints élastomère conducteurs.

Composants de blindage:

- cache-interrupteurs;
- joints tournants;
- joints de connecteurs;
- joints toriques;
- rubans;
- etc.

#### 4.2 *Exigences générales*

Les matériaux de blindage nécessaires à l'obtention de l'efficacité de blindage requise doivent répondre à plusieurs critères électriques, mécaniques et environnementaux.

##### *Exigences électriques*

Pour les matériaux de barrière, les valeurs de l'atténuation doivent être fournies pour les champs E et H, ainsi que pour les ondes planes dans la gamme de fréquences de 10 kHz à 1000 MHz. Pour les matériaux de jointoiement les mêmes informations sont exigées, ainsi que la résistance en continu. Pour les câbles blindés, l'impédance de transfert, et si nécessaire, l'admittance de transfert, sont exigées dans la gamme de fréquences de 10 kHz à 100 MHz.

##### *Exigences mécaniques*

Il convient que toutes les caractéristiques mécaniques nécessaires à la bonne utilisation des matériaux soient mises à la disposition de l'utilisateur. Elles sont listées dans les paragraphes qui suivent.

The figures help demonstrate the principle of operation and may also serve as examples of how the frequency-dependent parameters might be presented.

#### 4.1 *General classification for shielding devices*

Barrier materials:

- shielding materials;
- viewing windows;
- air vent panels;
- waveguide traps;
- conductive coatings;
- conductive adhesives and sealants.

Shielded cables and conduits:

- solid shields;
- leaky shields;
- connectors.

Gasketing materials:

- knitted wire mesh gaskets;
- metal fibers and screen gaskets;
- oriented wire gaskets;
- conductive elastomer gaskets.

Shielding components:

- toggle boots;
- shaft seals;
- connector gaskets;
- ring seals;
- foil tapes;
- etc.

#### 4.2 *General requirements*

The shielding materials needed to reach the required shielding effectiveness shall meet several electrical, mechanical and environmental criteria.

##### *Electrical requirements*

For barrier materials, attenuation values shall be supplied for E and H fields, and for plane waves in the frequency range 10 kHz to 1000 MHz. For gasketing materials the same information as above is required, and in addition, the d.c. resistance shall be provided. For shielded cables the specification of transfer impedance and, if necessary, transfer admittance in the frequency range 10 kHz to 100 MHz is required.

##### *Mechanical requirements*

All the mechanical characteristics necessary for the correct use of the materials should be available to the user. These are listed in the following subclauses.

### *Exigences d'environnement*

L'efficacité de blindage totale d'une enceinte blindée est limitée par la défaillance des joints dont l'objectif est d'assurer un contact électrique adéquat. L'intégrité de blindage d'un joint peut être augmentée en améliorant ce contact. Ceci peut être réalisé en utilisant un joint conducteur.

Toutefois, l'utilisation de certains joints n'assure pas l'intégrité de blindage pendant longtemps et les conditions d'environnement comme la poussière, l'humidité et les vapeurs doivent être prises en compte. Par exemple, pour étancher contre la poussière et l'humidité, des joints EMI plats ou en rubans associés à un élastomère spongieux ou solide sont indiqués. Par conséquent les informations relatives à l'environnement, pour une bonne utilisation d'un matériau spécifique de jointolement, sont requises.

### *4.3 Spécifications*

#### *4.3.1 Généralités*

Il convient de prendre en compte à la fois les aspects de conception mécanique et électrique afin de spécifier les dispositifs de protection.

Les spécifications comprennent:

- une description générale (présentation, but);
- une information sur l'application (utilisation particulière);
- une description (matériau, consistance, couleur, finition, etc.);
- les performances (atténuations en champs E, H et onde plane, résistance en continu, gamme de température, propriétés mécaniques, impédance de transfert et si nécessaire admittance de transfert);
- les dimensions;
- des recommandations d'utilisation (préparation surfacique, pression, précautions de fonctionnement et précautions liées à la sécurité);
- les méthodes de réalisation;
- la technique de montage (manière d'assembler);
- les recommandations de stockage.

#### *4.3.2 Matériaux de barrière*

##### *4.3.2.1 Matériaux de blindage*

Deux types sont généralement disponibles:

##### *a) Treillis*

L'efficacité de blindage dépend non seulement de la taille du volume à blinder, mais surtout de la dimension des mailles et de la réalisation du treillis. L'efficacité de blindage augmente quand la dimension des mailles diminue ou en utilisant un blindage double, les deux blindages étant isolés entre eux et ne présentant qu'un seul point de connexion à la terre.

Pour les dimensions de cage présentée à la figure 1, la fréquence de coupure est d'environ 80 MHz. Aux fréquences plus élevées, il y a une résonance qui entraîne des oscillations.

### *Environmental requirements*

The total shielding effectiveness of a shielded enclosure is limited by the failure of seams to achieve adequate electrical contact. The shielding integrity of a seam can be increased by improving this contact. This might be achieved by using conductive gasketing.

However, the use of certain gaskets does not maintain the shielding integrity for a long time and environmental conditions, such as dust, moisture and vapors shall be taken into consideration. For example, to seal against dust and moisture, flat or strip EMI gaskets joined to a sponge or solid elastomer are adequate. Therefore, information concerning the appropriate environmental use of specific gasketing materials is required.

## 4.3 *Specifications*

### 4.3.1 *General*

Both mechanical and electrical design aspects should be considered in order to specify protection devices.

Specifications include:

- general description (presentation, purpose);
- application information (specific use);
- material description (material, consistency, color, finish, etc.);
- performance characteristics (E, H and plane wave attenuation, d.c. resistance, temperature range, mechanical properties, transfer impedance and if necessary transfer admittance);
- dimensions;
- recommendations for use (surface preparation, pressure, safety and operational cautions);
- methods of construction;
- mounting techniques (way of assembly);
- storage recommendations.

### 4.3.2 *Barrier materials*

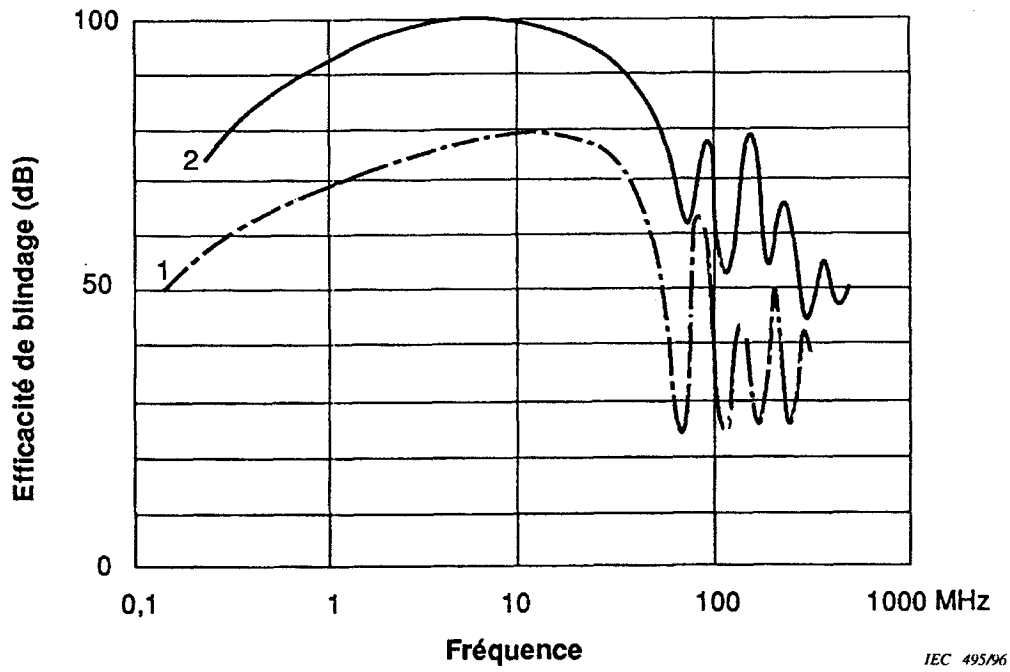
#### 4.3.2.1 *Shielding materials*

Two types are generally available:

##### a) *Wire mesh*

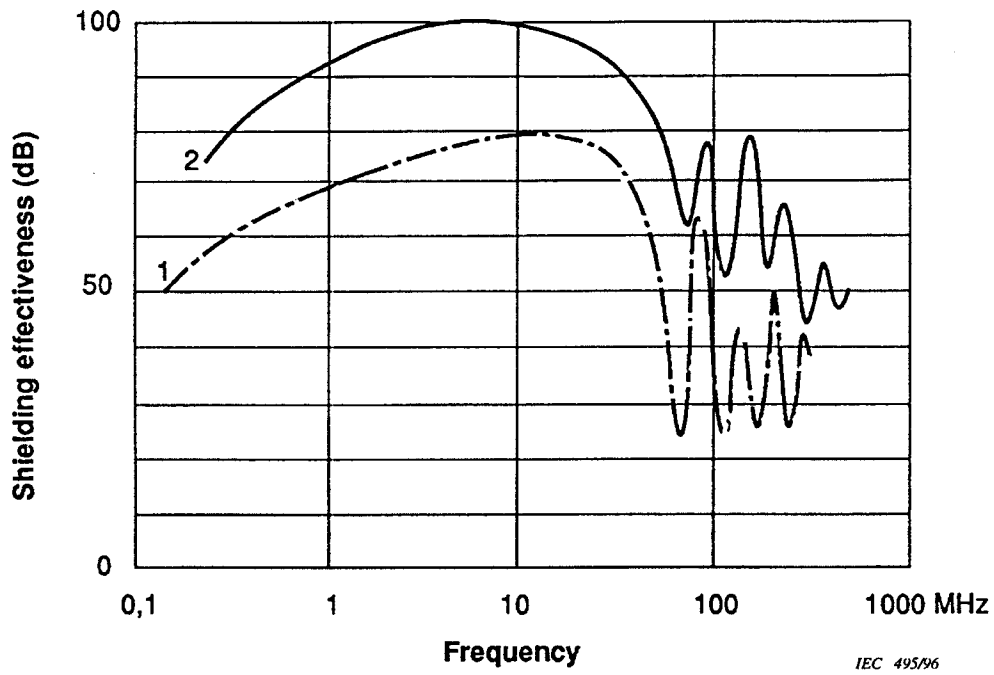
The shielding effectiveness depends on the size of the volume to be shielded, and especially on the mesh size and the wire mesh manufacturing. The shielding effectiveness increases when the mesh size decreases or when using a double shield, the two shields being insulated from each other and presenting only one connection point to the earth.

For the cage sizes presented in figure 1, the cut-off frequency is about 80 MHz. At higher frequencies, there is a resonant effect resulting in oscillations.



Courbe 1: dimensions 3 m × 3,25 m × 3 m  
Maille hexagonale: 15 mm × 17 mm  
Courbe 2: dimensions 4 m × 4 m × 3 m  
Maille carrée: 4 mm

Figure 1 – Atténuation typique de cages à double blindage



Curve 1: dimensions 3 m x 3,25 m x 3 m  
 Hexagonal mesh: 15 mm x 17 mm  
 Curve 2: dimensions 4 m x 4 m x 3 m  
 Square mesh: 4 mm

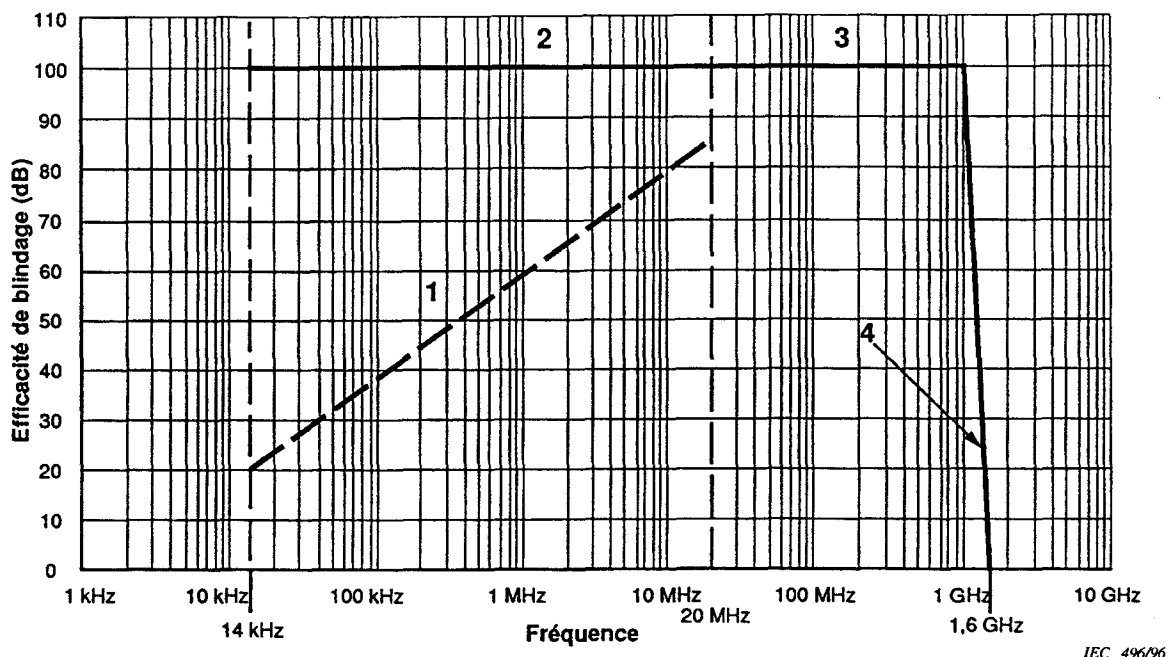
**Figure 1 – Typical plane wave attenuation for double-wall cages**

b) *Feuille de métal*

L'atténuation des cages à feuilles de métal homogènes est supérieure. L'efficacité de blindage augmente avec la fréquence du fait de l'épaisseur de peau, de telle sorte que même des feuilles minces sont efficaces aux fréquences élevées.

Des formules simples permettent de calculer les pertes par absorption, les pertes par réflexion et l'efficacité de blindage des feuilles de métal pour les ondes planes, quand leurs dimensions sont grandes par rapport aux longueurs d'ondes mises en jeu. Elles sont présentées à l'annexe A.

Un exemple de spécification d'efficacité de blindage d'une cage de Faraday est donné en figure 2.



- 1: champ magnétique
- 2: champ électrique
- 3: onde plane
- 4: guide d'ondes de 10 cm de diamètre sous la coupure

**Figure 2 – Exemple d'exigences IEM-HA de l'efficacité de blindage d'une cage de Faraday**

Spécifications demandées:

Cabines blindées:

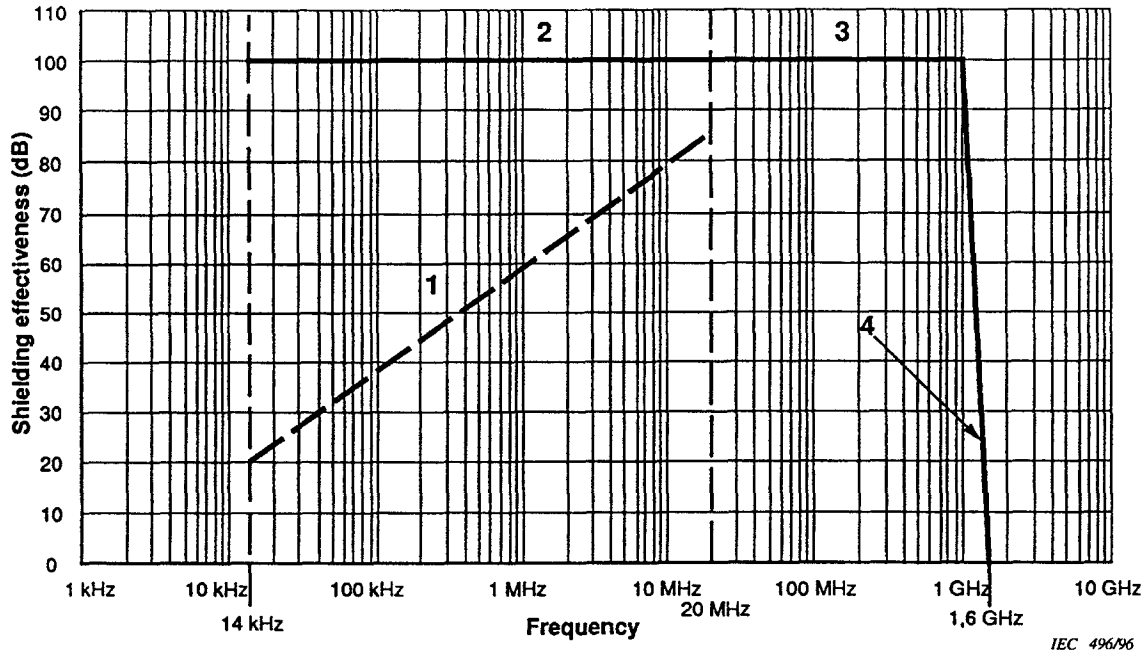
- une description générale;
- les dimensions des différents éléments;
- le poids;
- la méthode d'assemblage;
- les charges surfaciques et ponctuelles autorisées;
- le type de matériau;
- les types de portes possibles;
- les différentes plaques collectrices avec leurs caractéristiques mécaniques;
- l'efficacité de blindage.

### b) Metal sheet

The attenuation of cages with homogeneous metal sheets is higher. The shielding effectiveness increases with frequency due to the skin depth, so that even very thin sheets are efficient at high frequencies.

Simple formulas allow the computation of absorption losses, reflection losses and shielding effectiveness of metal sheets for plane waves when their dimensions are large compared to the wavelengths considered. These are presented in annex A.

An example of a specification for the shielding effectiveness of a Faraday cage is given in figure 2.



- 1: magnetic field  
 2: electric field  
 3: plane wave  
 4: 10 cm diameter waveguide below cut-off

**Figure 2 – Example of HEMP shielding effectiveness of a Faraday cage**

Specifications required:

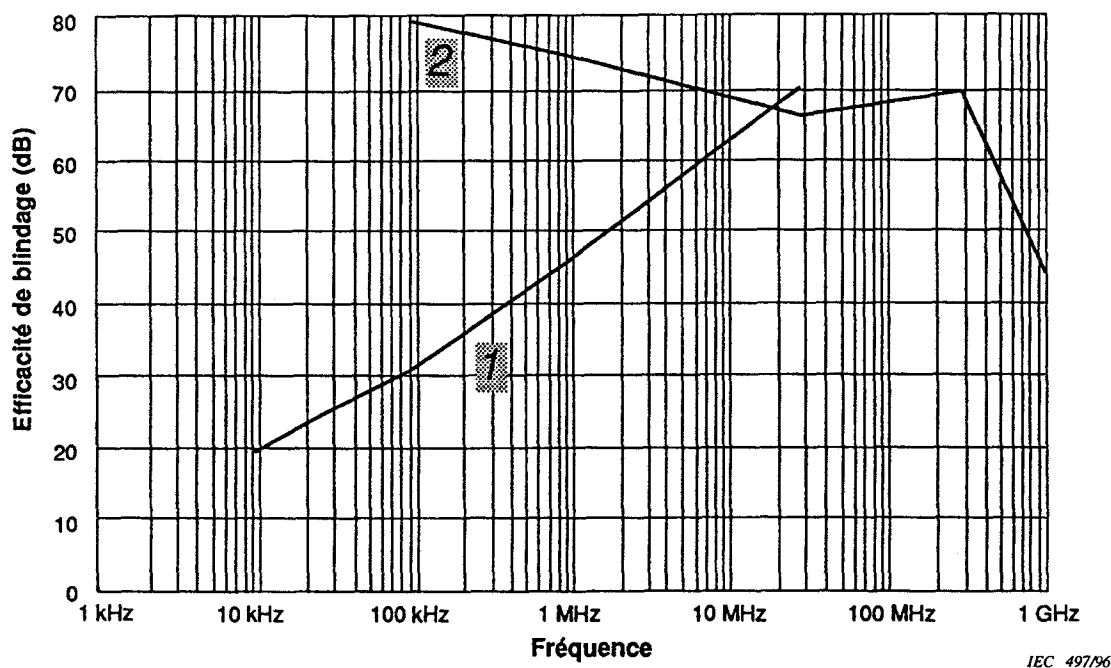
Shielded rooms:

- general description;
- dimensions of the different elements;
- weight;
- way of assembly;
- point and surface loads admitted;
- type of material;
- types of doors possible;
- different points of entry (POEs) with their mechanical characteristics;
- shielding effectiveness.

Coffrets:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- les dimensions totales;
- le poids;
- le type de matériau et la finition;
- l'efficacité de blindage (voir l'exemple de la figure 3).

NOTE - Il est de pratique courante d'appliquer un lubrifiant à base de silicone sur les contacts de portes. Cela peut entraîner une augmentation de la résistance de contact et dégrader par conséquent l'efficacité du blindage.



1: champ magnétique  
 2: champ électrique  
 Acier galvanisé d'épaisseur 2 mm; dimensions: 2 m × 2 m × 1 m  
 Porte: 1,8 m × 0,6 m; contact de porte: nickel - nickel

**Figure 3 – Exemple d'atténuation d'un coffret muni de joints**

#### 4.3.2.2 Fenêtres de visualisation

Les fenêtres de visualisation sont utilisées pour des matériels nécessitant des affichages pour lesquels le panneau de visualisation doit aussi servir à diminuer l'énergie électromagnétique rayonnée pénétrant dans la zone protégée.

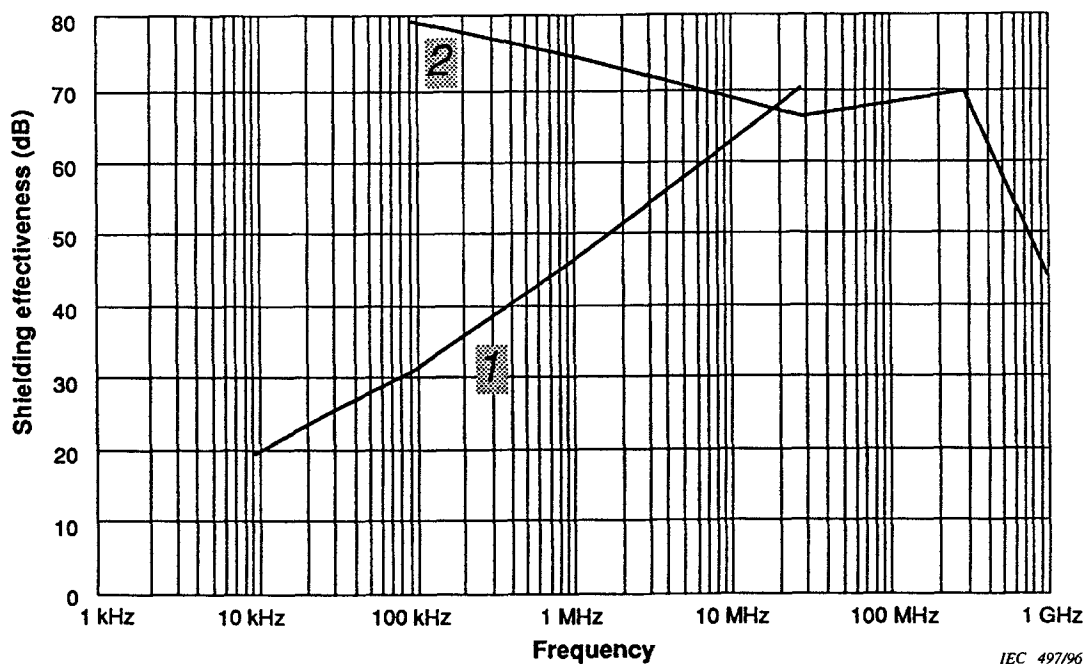
Elles peuvent être en verre, en plastique ou une combinaison des deux. Le blindage EMI est obtenu grâce à un treillis tricoté ou tissé, laminé entre les substrats de verre ou de plastique, ou par dépôt d'un revêtement conducteur.

L'efficacité de blindage est déterminée par la taille des ouvertures sur l'écran, par le contact électrique entre les fils et les matériaux ainsi que par les techniques utilisées pour la reprise des fils sur les bords de l'ouverture.

## Cabinets:

- general description;
- application information;
- overall dimensions;
- weight;
- type of material and finish;
- shielding effectiveness (see example in figure 3).

NOTE – It is common practice to use a silicon base lubricant on the door seams. This can lead to an increase of the contact resistance and consequently degrade the shielding effectiveness.



1: magnetic field  
 2: electric field  
 Galvanized steel thickness: 2 mm; dimensions: 2 m × 2 m × 1 m  
 Door: 1,8 m × 0,6 m; door contact: nickel - nickel

**Figure 3 – Example of attenuation of a cabinet with gaskets**

#### 4.3.2.2 Viewing windows

Viewing windows are used in equipment requiring visual displays where the viewing panel shall also serve to reduce radiated electromagnetic energy entering the protected area.

They can be manufactured in glass, plastic or combinations of both. EMI shielding is provided by knitted or woven wire mesh, laminated between the glass or plastic substrates, or by deposited conductive coatings.

The shielding effectiveness is determined by the size of the wire screen openings, electrical contact between intersecting wires and the materials and techniques employed to terminate the wires at the frame edge.

Dans l'hypothèse quasi-statique (dimensions  $\ll \lambda$ ), pour les fenêtres munies d'un film conducteur, le champ électrique ne pénètre pas grâce au phénomène de réflexion. Le cas du champ magnétique est différent. Le champ magnétique mesuré derrière une fenêtre de visualisation ( $H_2$ ) est réduit, en fonction de la fréquence, par rapport au champ mesuré au même endroit avec une ouverture ( $H_1$ ). La fonction d'atténuation est donnée par:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

où

$$\tau = 8 L / (3 \pi (R_s + 2 \pi R_c));$$

$R_s$  est la résistance de surface du film conducteur;

$R_c$  est la résistance du contact entre le film conducteur et le bord;

$L$  est l'inductance équivalente de la fenêtre.

Dans le cas des fenêtres de visualisation munies d'un grillage, la fonction d'atténuation en champ magnétique a la même forme. Cependant  $R_s$  est remplacée par  $Z_s = R_s + j\omega L_s$ , où  $R_s$  dépend de la résistance linéique du fil et des dimensions du grillage, et  $L_s$  dépend des dimensions de la fenêtre et du grillage.

Vis-à-vis du champ magnétique, les fenêtres de visualisation se comportent comme des filtres passe-bas (voir exemple à la figure 4).

Pour les fenêtres de visualisation munies d'un grillage, la fonction d'atténuation est indépendante de la fréquence, et ne dépend que de la nature et des dimensions des fenêtres et du grillage.

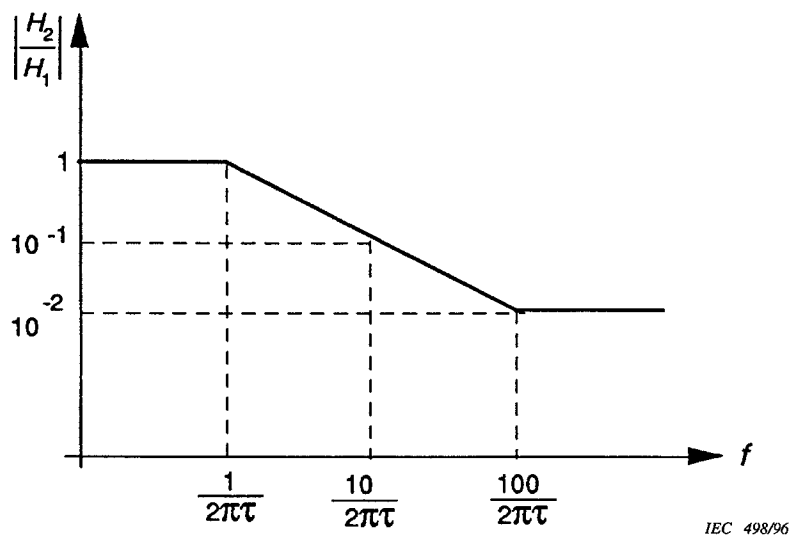


Figure 4 – Exemple de fonction d'atténuation en champ magnétique d'une fenêtre de visualisation

By assuming a quasi-static approximation (dimensions  $\ll \lambda$ ), for viewing windows with conductive coating, the electric field impedes only due to reflection effect. For the magnetic field it is different. The magnetic field measured behind a viewing window ( $H_2$ ) is reduced as a function of frequency relative to the field measured at the same location with an open aperture ( $H_1$ ). The attenuation function is given by:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

where

$$\tau = 8 L / (3 \pi (R_s + 2 \pi R_c));$$

$R_s$  is the surface resistance of the conductive film;

$R_c$  is the contact resistance between the conductive film and the frame edge;

$L$  is the window equivalent inductance.

In the case of viewing windows with meshes, the magnetic field attenuation function has the same shape. However,  $R_s$  is replaced by  $Z_s = R_s + j\omega L_s$ , where  $R_s$  depends on the linear resistance of the wire and mesh size, and  $L_s$  depends on the window and mesh sizes.

With magnetic fields, viewing windows behave like lowpass filters (see example in figure 4).

For viewing windows with meshes, the attenuation function is not frequency-dependent, and only depends on the nature and sizes of windows and mesh.

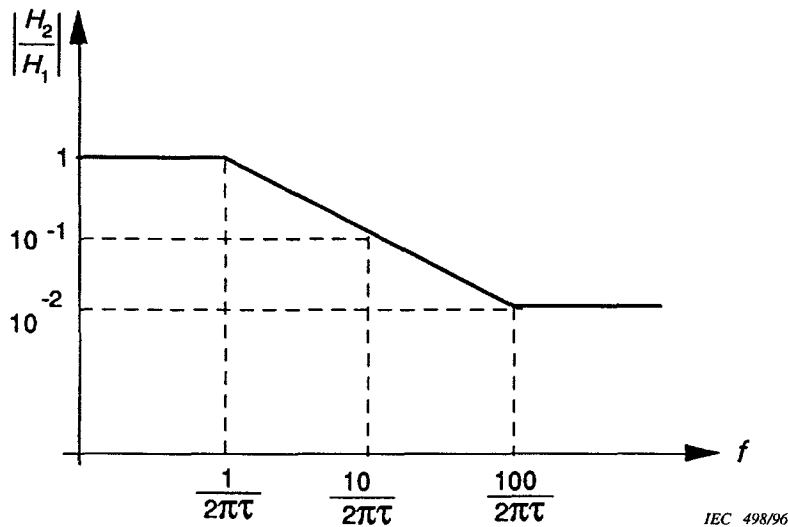


Figure 4 – Example of magnetic field attenuation function of a viewing window

La fonction d'atténuation du champ électrique est indépendante de la fréquence jusqu'à la fréquence de coupure de la fenêtre. Elle dépend des dimensions de la fenêtre et de la matière.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du produit (substrat optique, revêtement, cadre de montage, finition des bords, joint d'interfaçage et surfaces de raccordement, laminage avec raccordement périphérique, écran de blindage tricôté);
- les caractéristiques (efficacité de blindage, gamme de température, résistivité de surface du revêtement);
- les dimensions.

#### 4.3.2.3 *Panneaux d'aération*

Les panneaux d'aération sont utilisés pour les enceintes et coffrets des équipements électroniques qui nécessitent des niveaux importants de blindage EMI, et pour des entrées et sorties d'air servant à refroidir les équipements et à ventiler les fumées.

Ils sont adaptés à l'obtention d'une efficacité de blindage (*SE*) élevée aux fréquences hautes.

Les panneaux d'aération constitués de matériaux métalliques en nid d'abeille profitent du principe du guide d'ondes sous la coupure.

De tels panneaux sont fonctionnellement des grappes de guides d'ondes.

L'efficacité de blindage atteinte avec un nid d'abeille est donnée, pour les ondes planes, par:

$$SE(dB) = 27 \frac{T}{W} - 20 \log N$$

où

*T* est l'épaisseur du nid d'abeille;

*W* est la largeur de chaque cellule;

*N* le nombre de cellules.

NOTE - Cette formule est valable si la fréquence est faible comparée à la fréquence de coupure des guides d'ondes. Dans ce cas l'efficacité de blindage (*SE*) est indépendante de la fréquence. De plus elle est valable si  $27 \frac{T}{W} > 20 \log N$ .

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du produit (cadre, partie centrale du nid d'abeille, joint d'interfaçage, système de fixation, finition);
- les dimensions;
- l'efficacité de blindage, la gamme de température.

#### 4.3.2.4 *Guides d'ondes*

Les guides d'ondes sont utilisés quand des tiges non conductrices doivent passer à travers un blindage.

Comme dans le cas des panneaux d'aération, on tire profit du principe du guide d'ondes sous la coupure.

The electric field attenuation function is not frequency-dependent up to the cut-off frequency of the window. It depends on the window dimensions and material.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- product description (optical substrate, coating, mounting frame, busbar termination, interface gasketing and mating surfaces, edge-bonded lamination, knitted shielding screen);
- performance characteristics (shielding effectiveness, temperature range, surface resistivity of coating);
- dimensions.

#### 4.3.2.3 *Air vent panels*

Air vent panels are used in electronic equipment enclosures and cabinets that require high levels of EMI shielding and an air vent outlet or inlet for cooling equipment or ventilating fumes.

They are suitable for achieving high shielding effectiveness at high frequencies.

Air vent panels made of metal honeycomb materials take advantage of the waveguide below cut-off principle.

Such panels are functionally clusters of waveguides.

The shielding effectiveness achievable with a honeycomb is given for plane waves by:

$$SE(dB) = 27 \frac{T}{W} - 20 \log N$$

where

- $T$  is the honeycomb thickness;
- $W$  is the width of each cell;
- $N$  is the number of cells.

NOTE - This formula is valid if the frequency is low compared with the cut-off frequency of the waveguides. In that case,  $SE$  is independent of the frequency. Furthermore, it is valid if  $27 T/W > 20 \log N$ .

Specifications required:

- general description;
- application information;
- product description (frame, honeycomb core, interface gasket, blind fastener, finish);
- dimensions;
- shielding effectiveness, temperature range.

#### 4.3.2.4 *Waveguide traps*

Waveguide traps are used when non-conductive shafts have to go through a shield.

As for air vent panels, advantage is taken of the waveguide below cut-off principle.

Pour une section transversale donnée, l'efficacité de blindage obtenue avec un guide d'ondes est déterminée à partir de la formule suivante:

$$SE(dB) = 54,6 \left( \frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right)^{1/2} L$$

où

$\lambda_c$  est la longueur d'onde de coupure, en mètres;

$\lambda_c = 1,7 d$  ( $d$ : diamètre d'un guide d'ondes circulaire, en mètres);

$= 2 a$  ( $a$ : grand côté d'un guide d'ondes rectangulaire, en mètres);

$\lambda$  est la longueur d'onde à la fréquence considérée, en mètres,  $\lambda > \lambda_c$ ;

$L$  est la longueur du guide d'ondes, en mètres.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du produit (matériau, finition);
- la technique de montage (vissage, soudage);
- les dimensions;
- l'atténuation en dessous de la fréquence de coupure.

#### 4.3.2.5 *Revêtements conducteurs*

Les peintures hautement chargées de particules conductrices, comme de l'argent, du graphite ou du nickel sont un moyen économique pour blinder et mettre à la masse des enceintes en matière plastique sensibles aux interférences électromagnétiques.

L'efficacité de blindage est fonction du type et de la quantité de matériau conducteur utilisé. Etant donné que leurs caractéristiques se dégradent avec le temps, il convient d'utiliser ces revêtements avec précaution.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application (méthode d'application, précautions d'utilisation, préparation surfacique, etc.);
- les propriétés (résistivité surfacique, gamme de température, recommandations de stockage, etc.).

#### 4.3.2.6 *Adhésifs conducteurs et mastics étanches*

Les adhésifs conducteurs sont utilisés pour coller des fenêtres EMI, des aérateurs ou des joints tressés et pour assurer des contacts permanents et colmater des fissures et des brèches. Les mastics étanches peuvent être utilisés pour des applications concernant des ourlets ou des joints mis bout à bout, mais uniquement si les joints ne sont pas brisés.

Etant donné que leurs caractéristiques se dégradent avec le temps, il convient de les utiliser avec précaution.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application (méthode d'application, précautions d'utilisation, préparation surfacique, etc.);
- les propriétés (résistivité volumique, gamme de température, recommandations de stockage, etc.).

For a given cross-section, the shielding effectiveness provided by a waveguide is determined by the following formula:

$$SE(dB) = 54,6 \left( \frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right)^{1/2} L$$

where

- $\lambda_c$  is the cut-off wavelength, in metres;
- $\lambda_c = 1,7 d$  ( $d$ : diameter of a circular waveguide, in metres);
- $\lambda_c = 2 a$  ( $a$ : wider side of a rectangular waveguide, in metres);
- $\lambda$  is the wavelength at the frequency under consideration, in metres,  $\lambda > \lambda_c$ ;
- $L$  is the length of the waveguide, in metres.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- product description (material, finish);
- mounting technique (screwing, soldering);
- dimensions;
- below cut-off frequency attenuation.

#### 4.3.2.5 *Conductive coatings*

Paints highly filled with conductive particles, such as silver, graphite or nickel are a cost-effective method for the shielding and grounding of plastic enclosures susceptible to EMI.

The shielding effectiveness is a function of the type and amount of conductive material used.

As the characteristics of materials degrade with age, they should be used with care.

Specifications required:

- general description;
- application information (method of application, usage cautions, surface preparation, etc.);
- properties (surface resistivity, temperature range, storage recommendation, etc.).

#### 4.3.2.6 *Conductive adhesives and sealants*

Conductive adhesives are used to bond EMI windows, vents or mesh gaskets, to shield permanent seams and to fill cracks and gaps. Sealants can be used in lap or butt joint applications, but only if the joints are not broken.

As their characteristics degrade with age, they should be used with care.

Specifications required:

- general description;
- application information (method of application, usage cautions, surface preparation, etc.);
- properties (volume resistivity, temperature range, storage recommendations, etc.).

### 4.3.3 Câbles et conduits blindés

La tension et le courant induits à l'intérieur d'un câble blindé dépendent des caractéristiques du blindage, de la longueur du câble et de ses impédances de terminaison. Le paramètre important de blindage utilisé est l'impédance de transfert qui est le rapport de la tension de circuit ouvert induite par mètre de longueur sur un conducteur interne, au courant de blindage (voir l'annexe A).

#### 4.3.3.1 Blindages homogènes

Du fait de l'effet de peau, seules les fréquences relativement basses peuvent pénétrer à l'intérieur d'un blindage homogène.

Le blindage cylindrique fin est principalement utilisé. Il consiste en un tube de métal de section et d'épaisseur uniformes.

Sa fonction de transfert est donnée par la formule de Schelkunoff.

Pour un tube de rayon  $a$ , d'épaisseur  $T$  ( $T \ll a$ ) et de conductivité électrique du métal  $\sigma$ :

$$Z_T = \frac{1}{2\pi a \sigma T} \frac{(1+j) T}{sh \left[ (1+j) \left( \frac{T}{\delta} \right) \right] \delta}$$

où  $\delta$  est la profondeur de peau.

$$|Z_T| = \frac{R_0 u}{(chu - \cos u)^{1/2}}$$

où

$$u = 2T/\delta;$$

$R_0 = 1/(2\pi a \sigma T)$  est la résistance en continu du blindage par unité de longueur.

A une fréquence élevée où  $\delta = a$  et  $R_{HF} = 1/(2\pi a \sigma \delta)$ , l'amplitude de la fonction de transfert commence à décroître exponentiellement. Pour les blindages en cuivre, cette fréquence est d'environ 100 kHz.

Spécifications demandées:

- l'impédance de transfert en fonction de la fréquence jusqu'à 100 MHz;
- la conductivité électrique  $\sigma$ ;
- les dimensions mécaniques.

Des exemples d'impédances de transfert typiques sont donnés en figure 5 pour différents types de câbles.

#### 4.3.3.2 Blindages à fuites

Les blindages à fuites sont souvent inhomogènes et se trouvent souvent sur les câbles coaxiaux flexibles. Pour le durcissement en dehors des zones protégées, ils sont à utiliser avec précaution, spécialement dans le cas des lignes longues.

##### a) Blindages tressés

Les blindages tressés sont couramment utilisés dans l'industrie électronique. L'impédance de transfert  $Z_T$  dépend des caractéristiques du tissage (voir l'annexe A).

### 4.3.3 Shielded cables and conduits

The voltage and current induced inside a shielded cable depend on the shield characteristics, the length of the cable and its termination impedances. The important shield parameter used is the transfer impedance which is the ratio of the open-circuit voltage induced per metre of length on an internal conductor, to the shield current (see annex A).

#### 4.3.3.1 Solid shields

Due to the skin effect only relatively low frequencies may penetrate inside a solid shield.

The cylindrical thin-walled shield is mainly used. It consists of a metal tube of uniform cross-section and uniform wall thickness.

Its transfer impedance is given by Schelkunoff's formula.

For a tube with radius  $a$ , thickness  $T$  ( $T \ll a$ ) and electrical conductivity of metal  $\sigma$ :

$$Z_T = \frac{1}{2\pi a \sigma T} \frac{(1+j) T}{\operatorname{sh} \left[ (1+j) \left( \frac{T}{\delta} \right) \right] \delta}$$

where  $\delta$  is the skin depth.

$$|Z_T| = \frac{R_0 u}{(chu - \cos u)^{1/2}}$$

where

$u = 2T/\delta$ ; and

$R_0 = 1/(2\pi a \sigma T)$  is the d.c. resistance of the shield per unit length.

At a high frequency where  $\delta = a$  and  $R_{HF} = 1/(2\pi a \sigma \delta)$ , the magnitude of the transfer impedance begins to decrease exponentially. For copper shields, this frequency is about 100 kHz.

Specifications required:

- transfer impedance as a function of frequency up to 100 MHz;
- electrical conductivity  $\sigma$ ;
- mechanical dimensions.

Examples of typical transfer impedances for different types of cables are given in figure 5.

#### 4.3.3.2 Leaky shields

Leaky shields are often non-homogeneous and are often found on flexible coaxial cables. For hardening outside protected areas, they should be used with care, especially for long lines.

##### a) Braided-wire shields

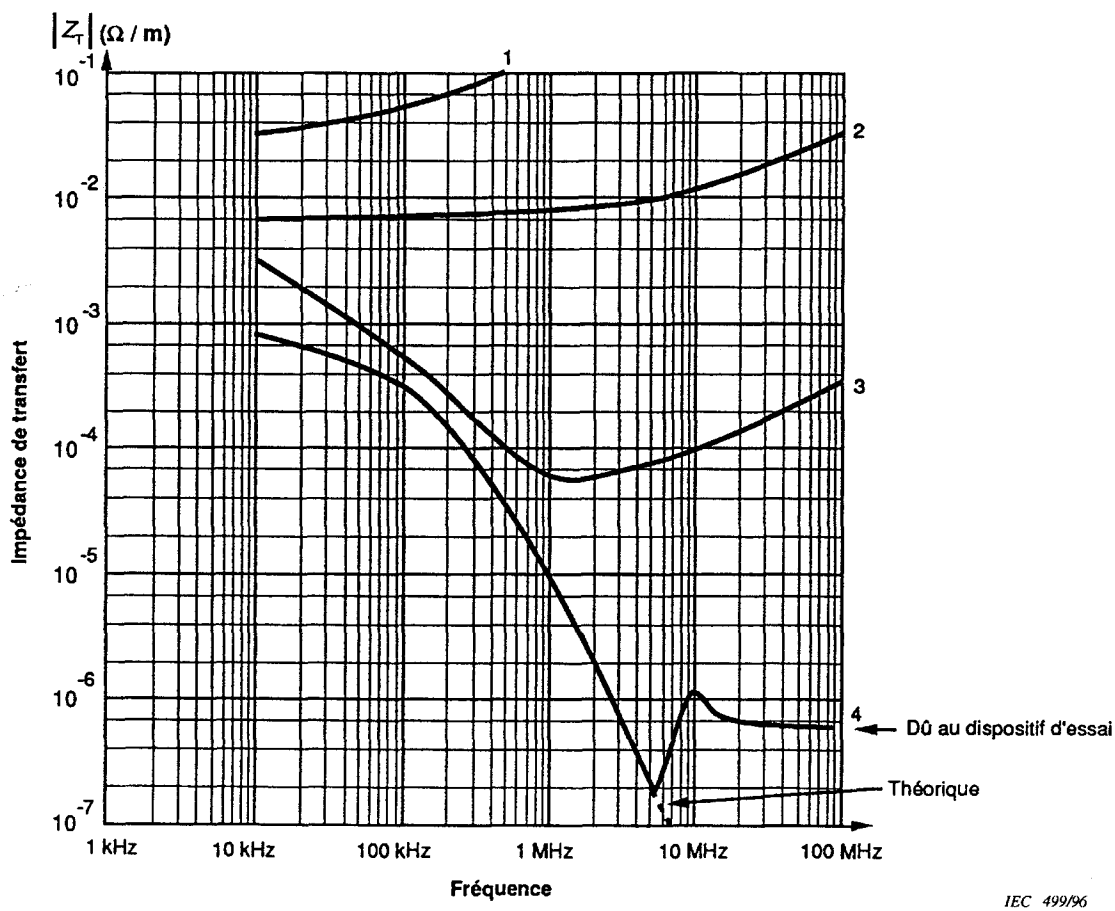
Braided-wire shields are commonly used in the electronics industry. The transfer impedance  $Z_T$  depends on the weaving characteristics (see annex A).

Aux fréquences basses, le blindage tressé se comporte comme un blindage homogène en une seule pièce ayant la même résistance en continu par unité de longueur. Aux fréquences élevées (à environ 1 MHz et au-delà), la pénétration du champ devient prédominante et il se couple directement aux conducteurs internes. Des blindages à tresses multiples réduisent cet effet et sont préférablement utilisés à l'extérieur des zones protégées pour des câbles dont la longueur dépasse 10 m.

Spécifications demandées:

- $Z_T$  en fonction de la fréquence jusqu'à 100 MHz.

Un exemple d'impédance de transfert en fonction de la couverture optique  $K$  et du nombre de fuseaux  $C$  est donné à la figure 6.



- 1: câble téléphonique
- 2: simple tresse en cuivre
- 3: double tresse en cuivre
- 4: blindage homogène en cuivre

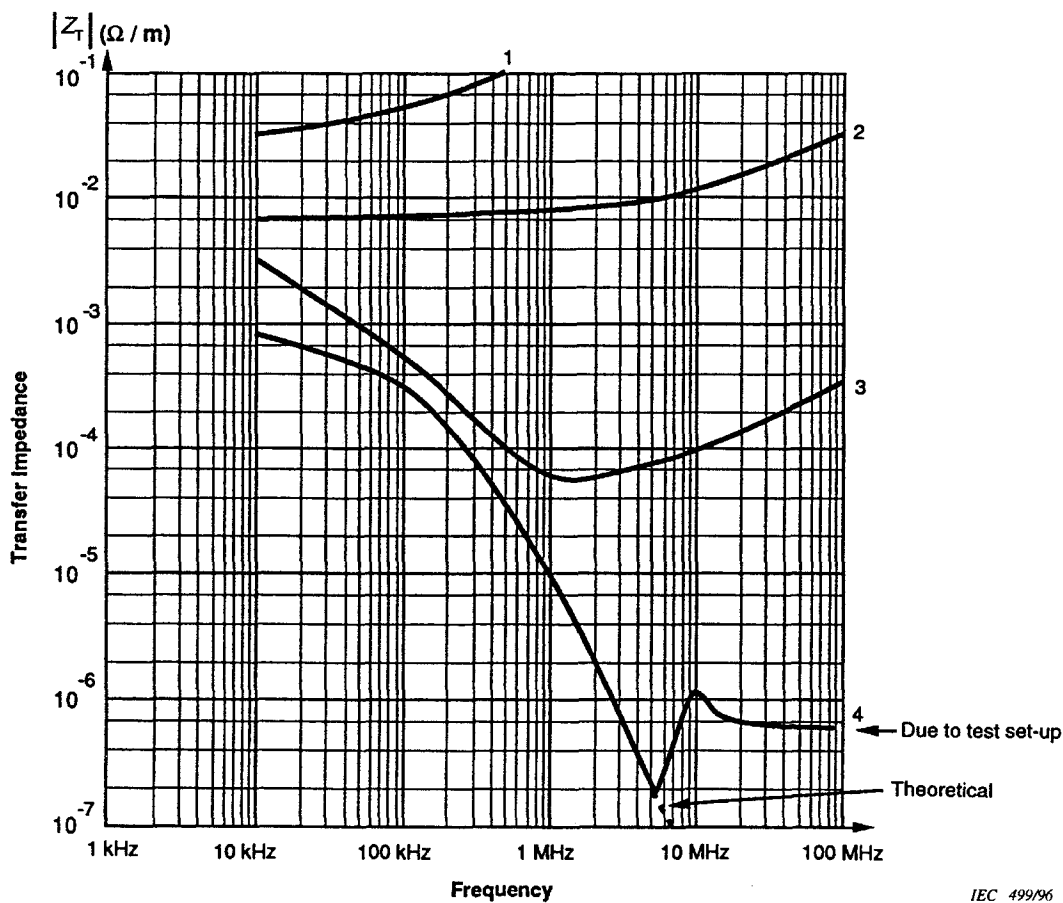
Figure 5 – Impédances de transfert expérimentales

At low frequencies, the braided-wire shield behaves like a solid homogeneous shield having the same d.c. resistance per unit length. At high frequencies (at about 1 MHz and above), the field penetration becomes predominant and couples directly with the inner conductors. Multiple braided-wire shields reduce this effect and are preferably used outside protected areas on cables longer than about 10 m.

Specifications required:

- $Z_T$  as a function of frequency up to 100 MHz.

An example of transfer impedance as a function of optical coverage  $K$  and number of carriers  $C$  is given in figure 6.



- 1: telephone cable
- 2: single copper braid
- 3: double copper braid
- 4: solid copper shield

Figure 5 – Experimental transfer impedances

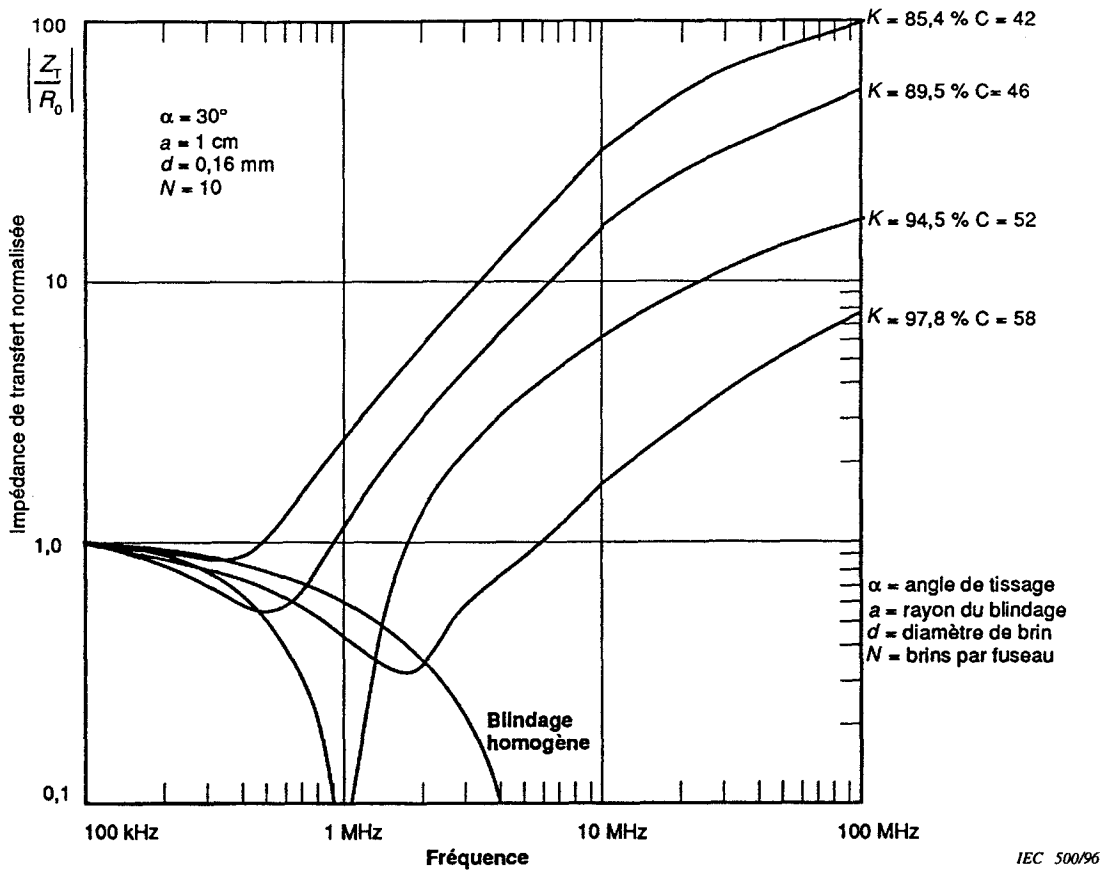


Figure 6 – Exemple d'impédance de transfert d'un blindage tressé

b) *Blindages à bande enroulée en hélice*

Les blindages à bande enroulée en hélice sont souvent utilisés quand la flexibilité du câble est requise.

Quand un bon blindage contre les interférences ou la diaphonie est demandé, le blindage à bande enroulée en hélice peut être utilisé conjointement avec un blindage tressé dans le but d'améliorer les performances du blindage.

L'équation de l'impédance de transfert  $Z_T$  est donnée en annexe A.

Spécifications demandées:

- $Z_T$  en fonction de la fréquence jusqu'à 100 MHz.

Un exemple d'impédance de transfert calculée pour un blindage à bande enroulée est donnée, en fonction de l'angle spiraloïde  $\alpha$ , à la figure 7.

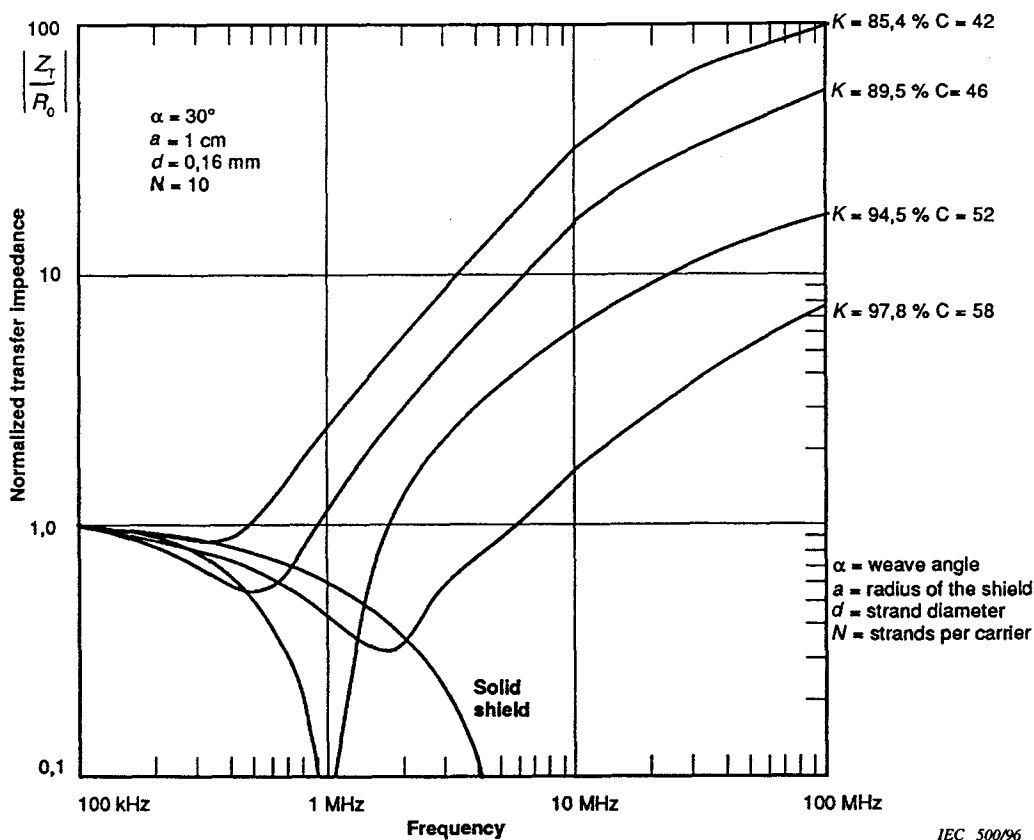


Figure 6 – Example of transfer impedance of a braided-wire shield

b) *Tape-wound shields*

Tape-wound shields are often used where flexibility of the cable is required.

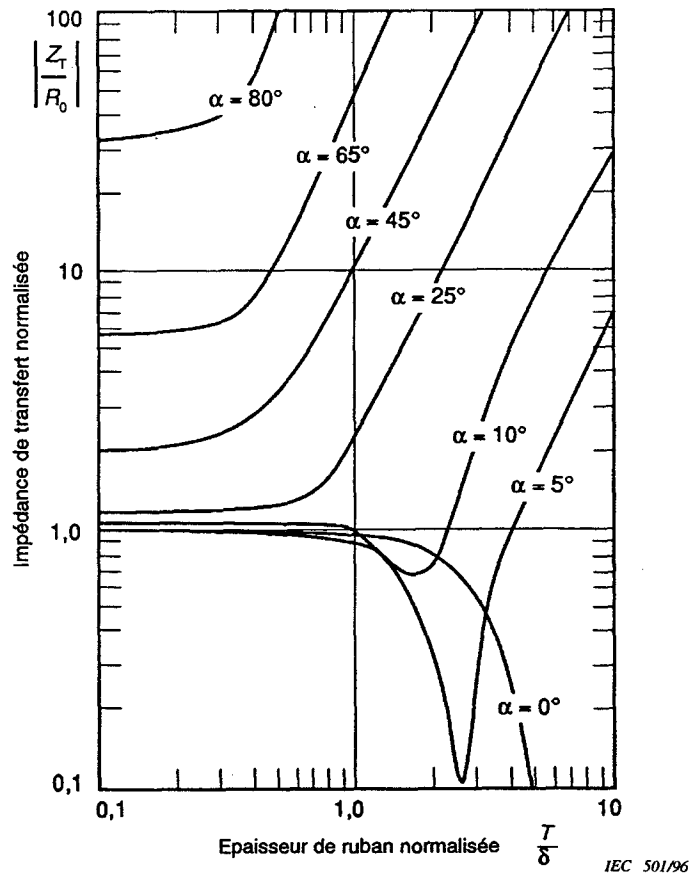
When good shielding from interference or crosstalk is required, the tape-wound shield can be used in conjunction with a braided-wire shield to improve the performance of the shield.

The equation for transfer impedance  $Z_T$  is given in annex A.

Specifications required:

- $Z_T$  as a function of frequency up to 100 MHz.

An example of transfer impedance computed for a tape-wound shield is given, as a function of the spiral angle  $\alpha$ , in figure 7.



**Figure 7 – Exemple d'impédance de transfert calculée pour un blindage à bande enroulée**

4.3.3.3 *Connecteurs*

Les connecteurs sont utilisés pour effectuer l'interfaçage des câbles blindés avec les enceintes blindées. Ils contiennent généralement des fentes et des fissures à travers lesquelles les champs électromagnétiques externes peuvent pénétrer à l'intérieur des câbles. De plus, ils présentent des résistances localisées en série avec la résistance de contact des surfaces de raccordement, ce qui produit une chute de tension et une pénétration de champ magnétique sur les conducteurs internes.

L'impédance de transfert (en ohms) d'un connecteur est donnée par:

$$Z_T = R_0 + j\omega M$$

où

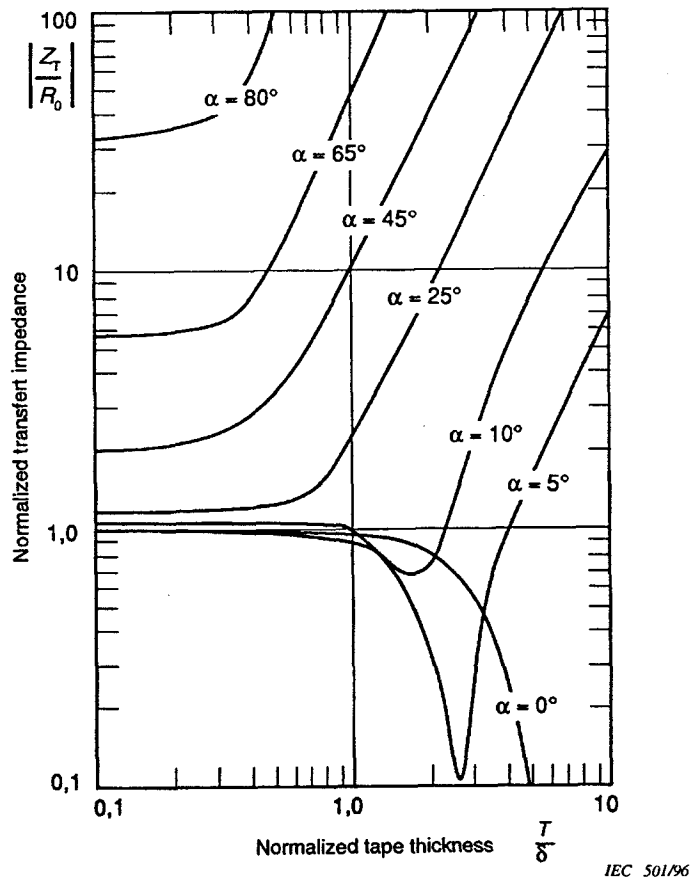
$R_0$  est la résistance mesurée à travers le connecteur;

$M$  est l'inductance mutuelle entre le blindage extérieur et les conducteurs internes du câble.

Des connecteurs avec  $R_0$  inférieure à  $1\text{m}\Omega$  et  $M$  de l'ordre de  $10\text{ pH}$  sont disponibles.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- l'impédance de transfert;
- les caractéristiques (mécaniques, électriques, climatiques et la résistance aux fluides);
- les types de contacts (par pincement, directs);
- et toutes les informations nécessaires, schémas et dessins.



**Figure 7 – Example of transfer impedance computed for a tape-wound shield**

#### 4.3.3.3 Connectors

Connectors are used to interface shielded cables with shielded enclosures. They normally contain slots or cracks through which external electromagnetic fields can penetrate to the inside of the cables. Furthermore, they often have a lumped series resistance associated with the contact resistance of the mating surfaces, which produces a voltage drop and a magnetic field penetration to the inner conductors.

The transfer impedance (in ohms) of a connector is given by:

$$Z_T = R_0 + j\omega M$$

where

$R_0$  is the resistance measured across the connector; and

$M$  is the mutual inductance between the external shield and the inner conductors of the cable.

Connectors are available with  $R_0$  lower than 1 mΩ and  $M$  about 10 pH.

Specifications required:

- general description;
- transfer impedance;
- characteristics (mechanical, electrical, climatic and resistance to fluids);
- types of contacts (crimps, straight pulls);
- and all the necessary information, drawings and layouts.

#### 4.3.4 *Matériaux de jointoiment*

##### 4.3.4.1 *Joints à fils tricotés*

D'une manière générale, les joints à fils tricotés sont adaptés pour des applications ne nécessitant pas des ouvertures et des fermetures répétées ou des propriétés de scellement exceptionnelles.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du matériel (tricot, noyau élastomère, largeur, épaisseur, poids);
- les caractéristiques (efficacité de blindage, impédance de transfert, capacité en courant, gamme de température, élasticité, élongation, décolletage, soudabilité, résistance à la corrosion);
- les dimensions;
- la technique de montage.

##### 4.3.4.2 *Ecrans et fibres métalliques*

Les écrans et fibres métalliques sont idéaux pour des applications où l'espace est limité et des joints d'épaisseur minimale nécessaires.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du matériel (métal, élastomère de scellement, fil d'écran, couleur);
- les caractéristiques (efficacité de blindage, impédance de transfert, capacité en courant, gamme de température, force de fermeture recommandée, taux de fuite);
- les dimensions.

##### 4.3.4.3 *Joints à fils orientés*

Les joints à fils orientés sont constitués de matériaux composites consistant en des inclusions de fils fins unitaires, noyés et fixés dans un élastomère. Ils sont recommandés pour la suppression des interférences électromagnétiques, la mise à la masse, ou la protection contre les décharges électrostatiques quand un fil lâche ou des fragments de fil ne doivent pas endommager les parties électriques ou mécaniques tout en permettant à chaque fil d'agir comme un élément élastique.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du matériel (fil, élastomère, distribution, couleur);
- les caractéristiques (efficacité de blindage, impédance de transfert, capacité en courant, gamme de température, force de fermeture recommandée, compressibilité, taux de compression);
- les dimensions.

##### 4.3.4.4 *Elastomères conducteurs*

Les élastomères conducteurs sont utilisés lorsque les propriétés électriques et mécaniques doivent rester stables au cours du temps et lorsqu'une fermeture hermétique excellente vis-à-vis de l'humidité et de la pression doit être fournie tout en conservant une efficacité de blindage élevée.

#### 4.3.4 *Gasketing materials*

##### 4.3.4.1 *Knitted wire mesh gaskets*

Generally, knitted wire mesh gaskets are suited for applications which do not require repeated opening and closing or exceptional environmental sealing properties.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- material description (wire mesh, elastomer core, width, thickness, weight);
- performance characteristics (shielding effectiveness, transfer impedance, current-carrying capability, temperature range, pull strength, elongation, necking, solderability, corrosion resistance);
- dimensions;
- mounting technique.

##### 4.3.4.2 *Metal fibers and screens*

Metal fibers and screens are ideal for applications where space is limited and gaskets of minimum thickness are required.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- material description (metal, sealing elastomer, wire screen, color);
- performance characteristics (shielding effectiveness, transfer impedance, current-carrying capability, temperature range, recommended closing force, leak rate);
- dimensions.

##### 4.3.4.3 *Oriented wire gaskets*

Oriented wire gaskets are made of composite materials consisting of scores of individual fine wires imbedded and bonded in an elastomer. They are recommended for EMI suppression, grounding, or protection from static discharge where loose wire or wire fragments are not to damage electrical or mechanical parts while permitting each wire to act as an independent spring element.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- material description (wire, elastomer, distribution, color);
- performance characteristics (shielding effectiveness, transfer impedance, current-carrying capability, temperature range, recommended closing force, compressibility, compression set);
- dimensions.

##### 4.3.4.4 *Conductive elastomers*

Conductive elastomers are used when electrical and mechanical properties have to be stable over time and when excellent hermetic sealing has to be provided while keeping a high shielding effectiveness.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du matériel (élastomère, garniture, couleur, texture, forme);
- les caractéristiques (efficacité de blindage, impédance de transfert, capacité en courant, gamme de température, dureté, résistivité volumique, force de tension, conductibilité thermique, limite d'étirement);
- les dimensions.

4.3.5 *Composants de blindage*

Les composants de blindage sont utilisés pour blinder et fermer hermétiquement des boutons à levier, des connecteurs, des brides de guides d'ondes ou des contacts sur des cabines ou enceintes blindées.

Spécifications demandées:

- une description générale;
- une information sur l'application;
- une description du matériau;
- les caractéristiques (efficacité de blindage, impédance de transfert, capacité en courant, gamme de température, nombre de manoeuvres permises, dureté, résistivité volumique, force de tension, limite d'étirement);
- les dimensions.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- material description (elastomer, filler, color, texture, product form);
- performance characteristics (shielding effectiveness, transfer impedance, current-carrying capability, temperature range, hardness, volume resistivity, tensile strength, thermal conductivity, elongation to break);
- dimensions.

#### 4.3.5 *Shielding components*

Shielding components are used to shield and seal conventional toggle switches, connectors, waveguide flanges or seams on shielded rooms or enclosures.

Specifications required:

- general description;
- application information;
- material description;
- performance characteristics (shielding effectiveness, transfer impedance, current-carrying capability, temperature range, number of actuations allowed, hardness, volume resistivity, tensile strength, elongation to break);
- dimensions.

## Annexe A (informative)

### Théorie générale

#### A.1 Efficacité de blindage des barrières

Le blindage contre l'IEM-HA est normalement électriquement épais et la performance est déterminée par les défauts apparus au cours du processus de fabrication. Dans le cas des matériaux électriquement minces, la performance est déterminée par la taille et la forme de l'enceinte et les trous, ouvertures, etc. Les formules unidimensionnelles relatives à la réflexion et à l'absorption s'appliquent uniquement aux plans de dimension infinie et ne sont pas valables dans le cas des enceintes blindées à trois dimensions.

L'expression de l'efficacité de blindage est:

$$SE(dB) = A(dB) + R(dB) + B(dB)$$

= absorption + réflexion + réflexion interne

L'absorption s'exprime de la manière suivante:

$$A(dB) = 0,1315T \sqrt{f\mu_r\sigma_r}$$

où

$T$  est l'épaisseur de barrière, en millimètres;

$f$  est la fréquence, en hertz;

$\mu_r$  est la perméabilité relative du métal par rapport à l'air;

$\sigma_r$  est la conductivité relative par rapport au cuivre.

L'expression suivante peut être utilisée:

$$A(dB) = 8,69 \frac{T}{\delta}$$

où

$\delta$  est l'épaisseur de peau =  $(\pi\mu\sigma f)^{-1/2}$ , en mètres;

$\mu$ ,  $\sigma$  sont les valeurs absolues de la perméabilité et de la conductivité.

L'absorption augmente d'environ 9 dB chaque fois que l'épaisseur croît d'une épaisseur de peau.

La réflexion peut être calculée à partir de :

$$R(dB) = 168 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right) \quad \text{pour les ondes planes;}$$

$$R(dB) = 322 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f^3} \right) \quad \text{pour les ondes de type électrique;}$$

$$R(dB) = 15 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r r^2 f}{\mu_r} \right) \quad \text{pour les ondes de type magnétique;}$$

où  $r$  est la distance de la source à la barrière, en mètres.

Des exemples de réflexion et de réflexion et absorption composites, pour des barrières infiniment grandes en cuivre et en fer, sont données respectivement aux figures A.1 et A.2.

## Annex A (informative)

### General theory

#### A.1 Shielding effectiveness of barriers

For HEMP shielding, the shield is normally electrically thick and the shielding performance is determined by defects in the manufacturing process. For electrically thin materials, the shielding performance is determined by the size and shape of the enclosure and holes, gaps, etc. The one-dimensional formulas for reflection and absorption apply to an infinite plane sheet and are not valid for a practical three-dimensional shielded enclosure.

The expression of the shielding effectiveness is:

$$SE(dB) = A(dB) + R(dB) + B(dB)$$

= absorption + reflection + internal reflection

The absorption loss is expressed as follows:

$$A(dB) = 0,1315T\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$$

where

- $T$  is the thickness of barrier, in millimetres;
- $f$  is the frequency; in hertz;
- $\mu_r$  is the magnetic permeability of metal relative to air;
- $\sigma_r$  is the conductivity relative to copper.

The following expression can be used instead:

$$A(dB) = 8,69\frac{T}{\delta}$$

where

- $\delta$  is the skin depth =  $(\pi\mu\sigma f)^{-1/2}$ , in metres;
- $\mu, \sigma$  are the absolute values of permeability and conductivity.

The absorption increases about 9 dB each time the thickness extends over one skin depth.

The reflection may be calculated from:

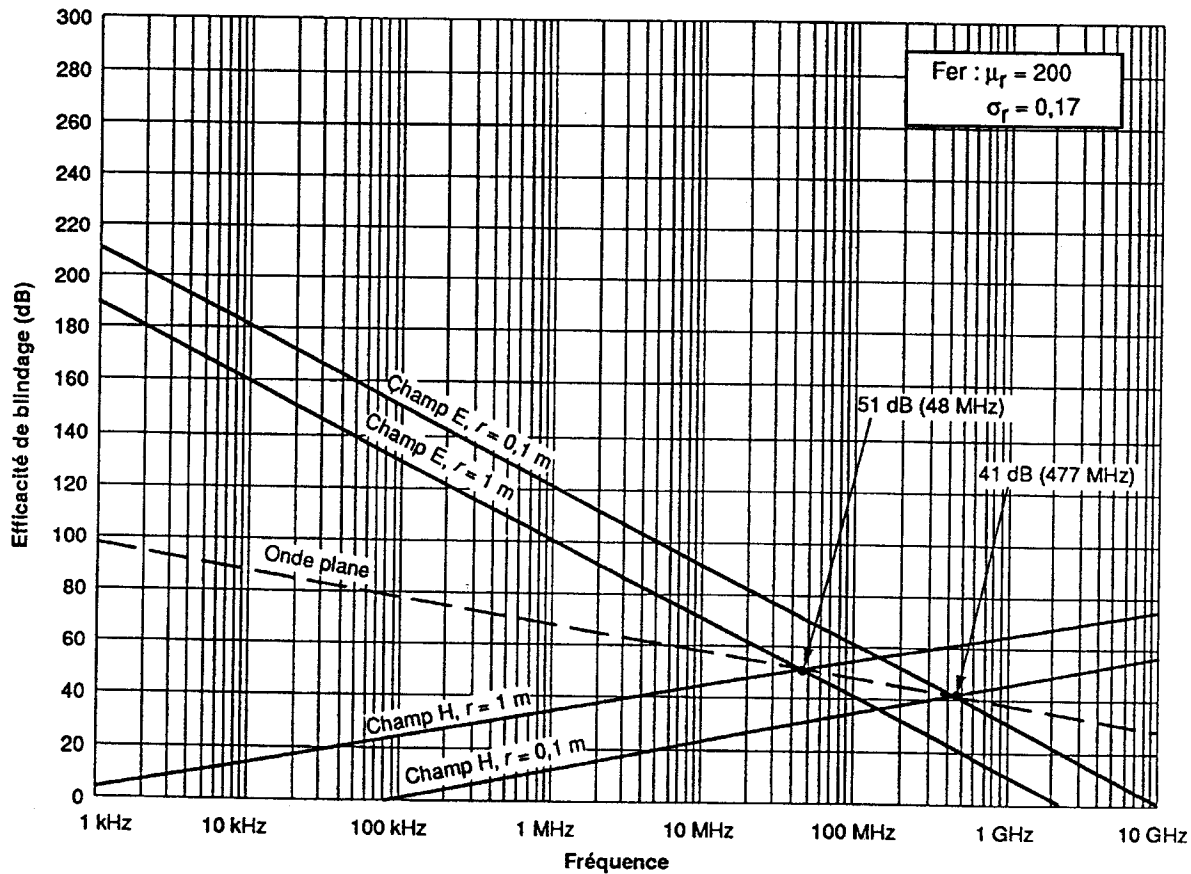
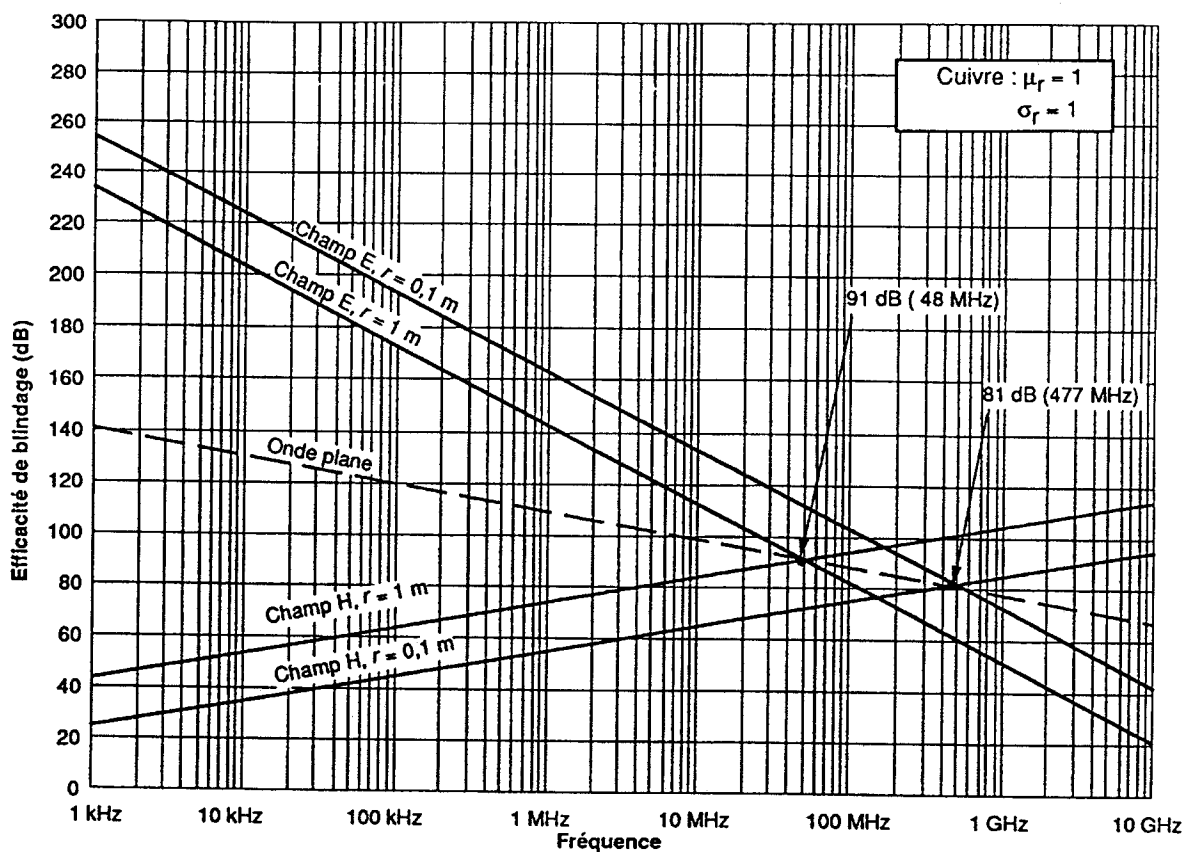
$$R(dB) = 168 + 10\log\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f}\right) \quad \text{for plane waves;}$$

$$R(dB) = 322 + 10\log\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f^3}\right) \quad \text{for electric waves;}$$

$$R(dB) = 15 + 10\log\left(\frac{\sigma_r r^2 f}{\mu_r}\right) \quad \text{for magnetic waves;}$$

where  $r$  is the distance from source to barrier, in metres.

Examples of reflection and composite reflection plus absorption, for infinitely large barriers made of copper and iron, are given in figures A.1 and A.2, respectively.



IEC 502/96

Figure A.1 – Réflexion théorique ( $R_{dB}$ ) pour le cuivre et le fer

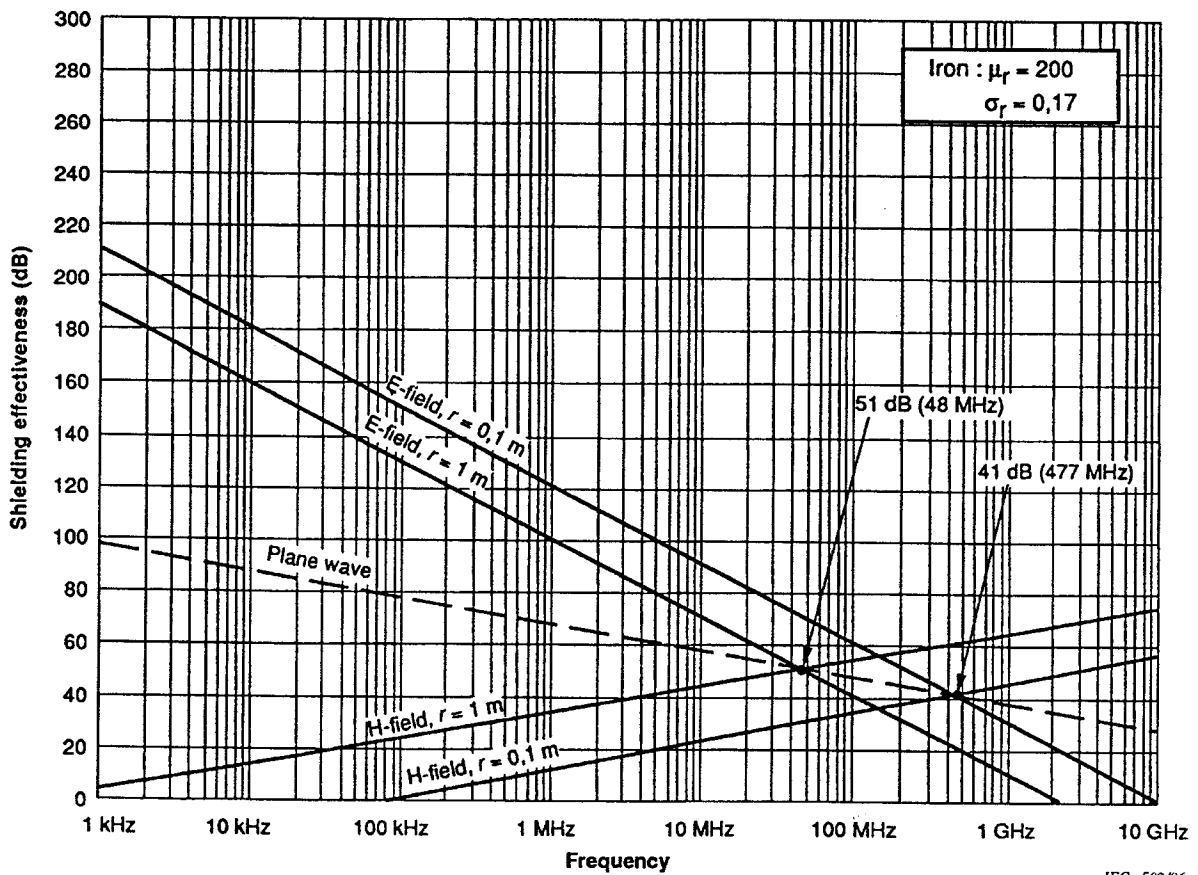
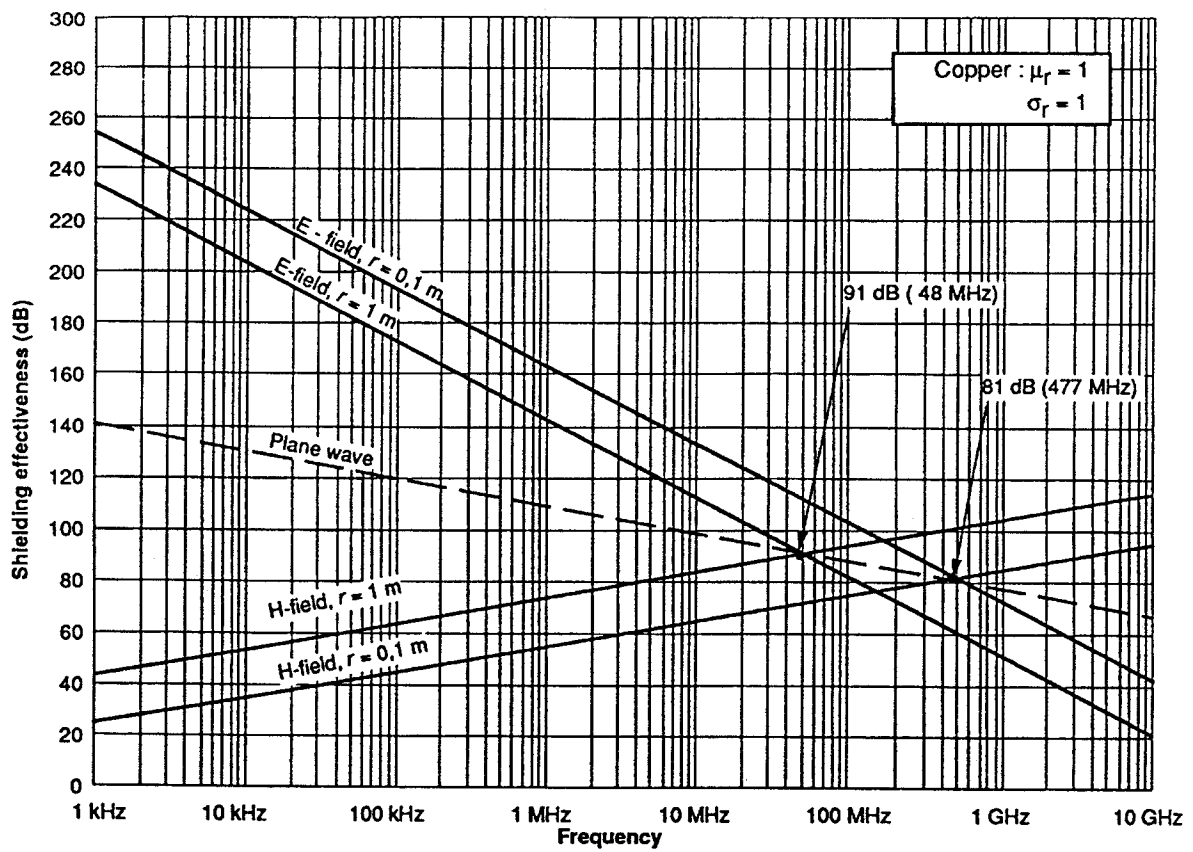


Figure A.1 – Theoretical reflection ( $R_{dB}$ ) for copper and iron

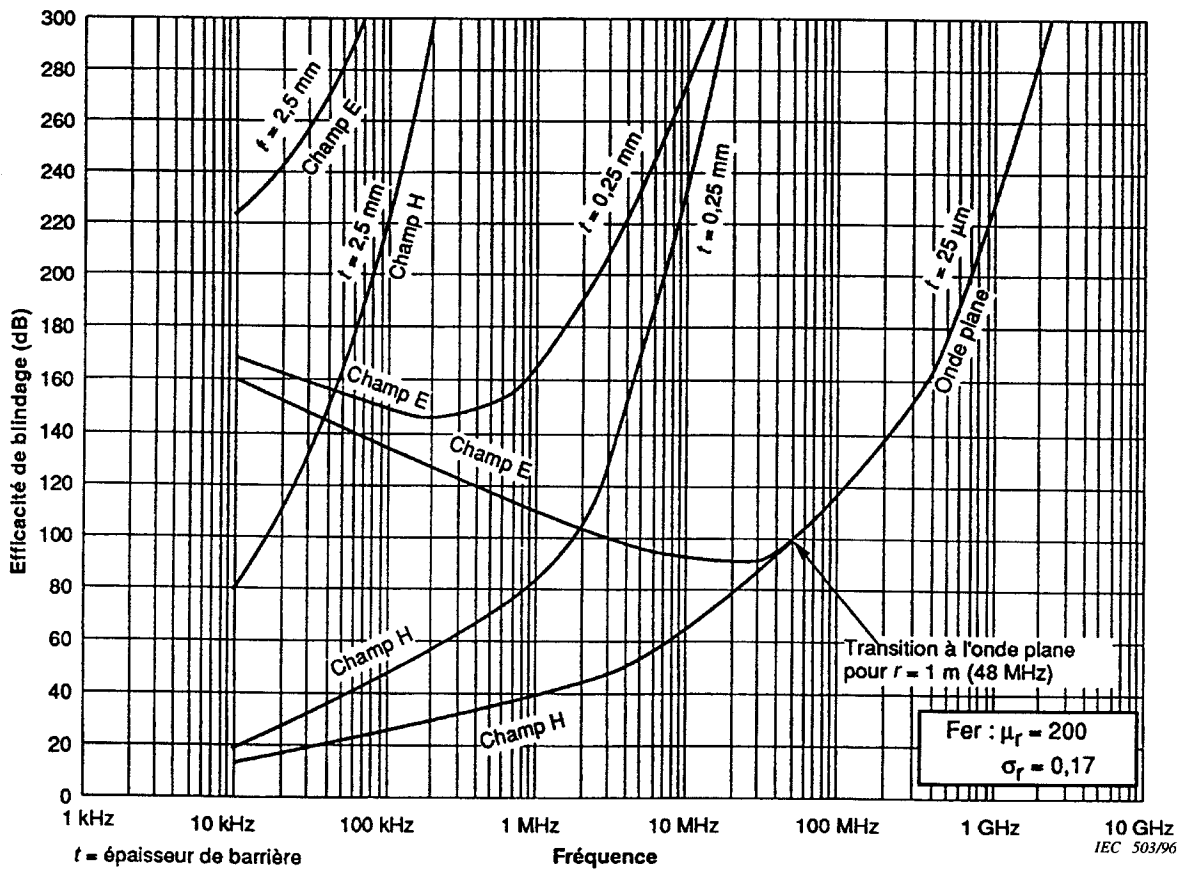
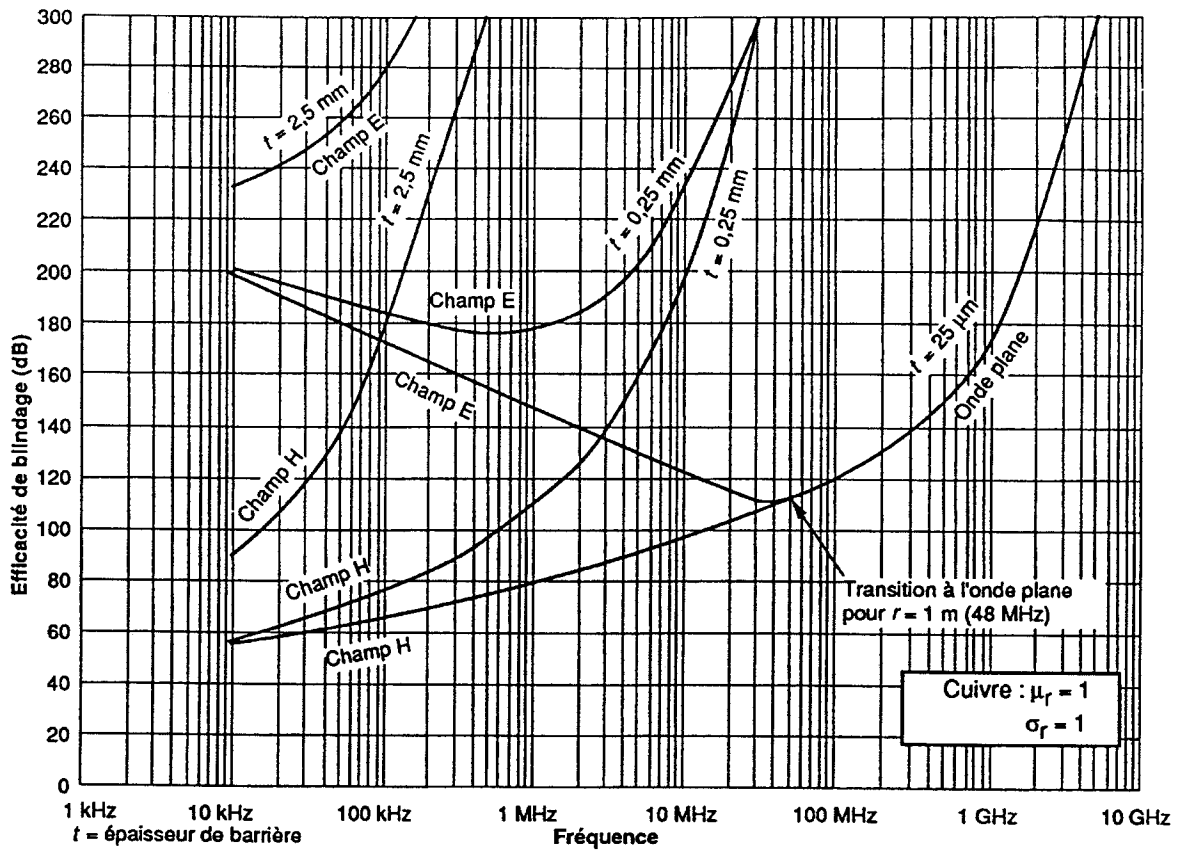


Figure A.2 – Réflexion ( $R_{dB}$ ) et absorption ( $A_{dB}$ ) théoriques composites pour le cuivre et le fer

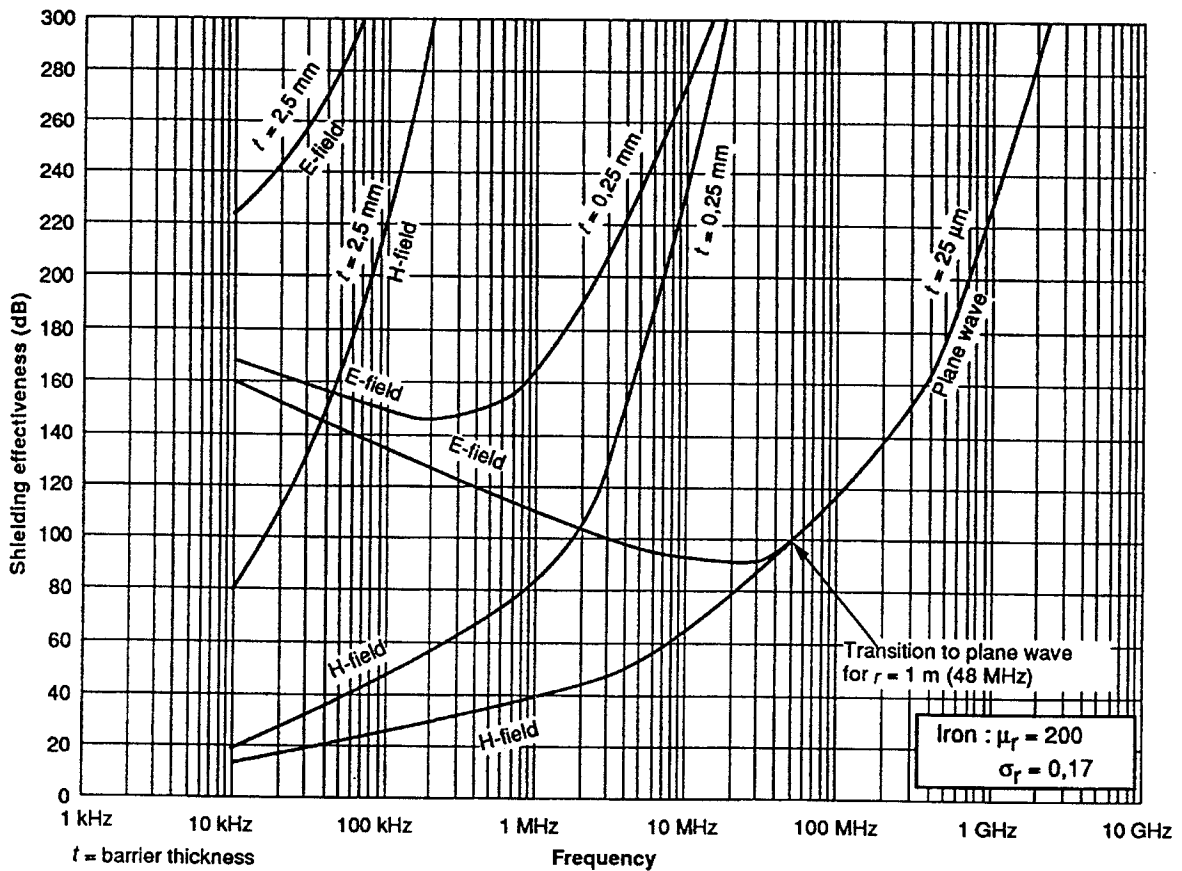
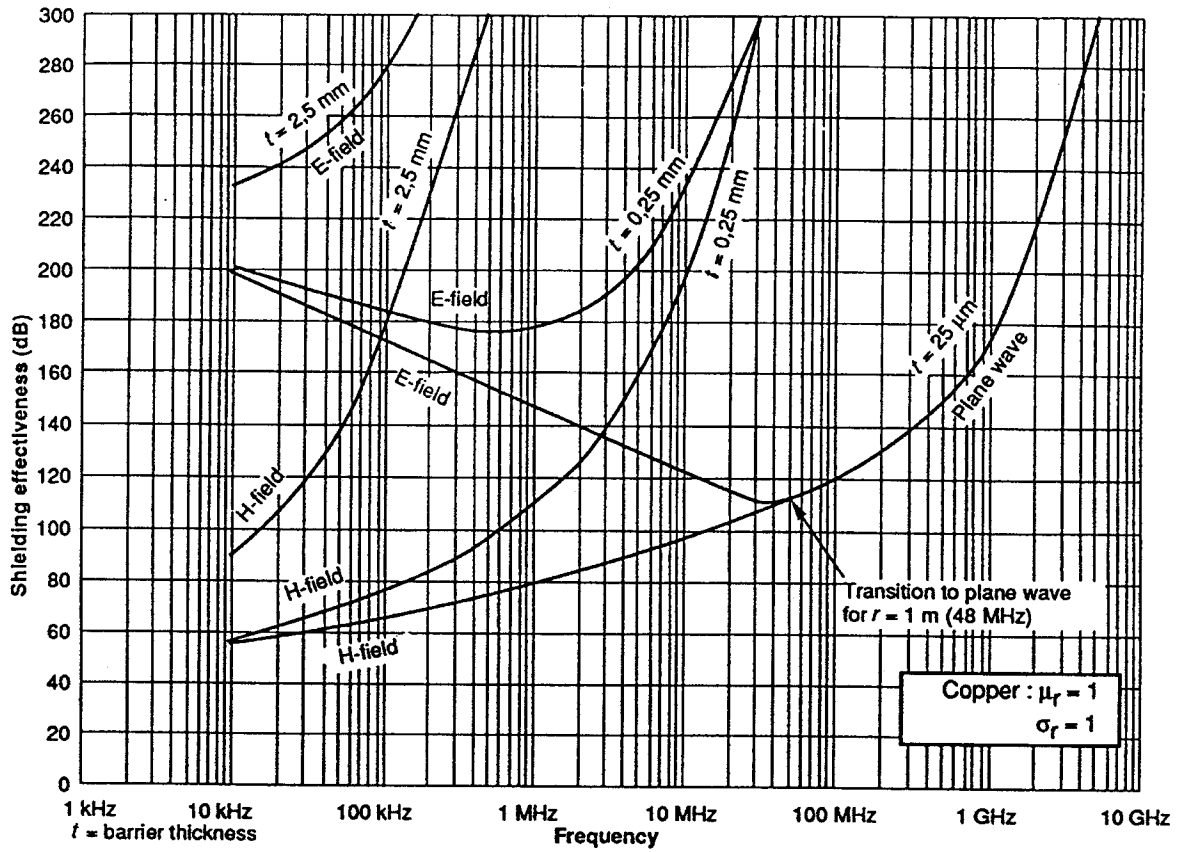


Figure A.2 – Theoretical composite reflection ( $R_{dB}$ ) and absorption ( $A_{dB}$ ) for copper and iron

La réflexion interne  $B$  est généralement négligée. Si l'absorption est supérieure à 10 dB,  $B$  est très faible.

## A.2 Théorie de l'impédance de transfert

### A.2.1 Phénomène de couplage à travers la gaine d'un câble

Si un câble blindé est illuminé par un champ électromagnétique, les composantes du champ électrique et du champ magnétique vont se coupler à travers la gaine du câble et induire des courants et des tensions perturbateurs à l'intérieur du câble. Le champ magnétique va induire un courant  $I_s$  dans la gaine du câble. De plus dans le cas des câbles tressés, les champs électriques et magnétiques pénétrant à travers les ouvertures de la gaine vont induire une tension entre le conducteur interne et la gaine.

L'effet dû au champ magnétique est généralement le plus important. Le courant  $I_s$  induit dans la gaine du câble se divise en une partie  $I_i$  qui retourne dans le conducteur interne, et une partie  $I_g$  qui s'écoule dans un conducteur de retour qui peut être la terre (voir figure A.3). Par conséquent:

$$I_s = I_g + I_i$$

La circulation de ces courants dans la gaine du câble va y créer un champ électrique axial. Du fait de l'effet de peau, les distributions du courant et du champ électrique associé, dans la section transversale de la gaine, ne sont pas uniformes. Si  $I_g$  est le courant circulant sur la surface extérieure de la gaine, le champ électrique  $E_i$  sur la surface interne est produit par un courant plus faible, le facteur d'atténuation étant exprimé par le biais de l'impédance de transfert.

L'expression analytique complète du champ électrique  $E_i$  a été introduite par Schelkunoff et elle est donnée par:

$$E_i = Z_{aa} I_i + Z_T I_g$$

où

$Z_{aa}$  est l'impédance de la surface externe de la gaine;

$Z_T$  est appelée l'impédance de transfert du câble.

Cette valeur est définie par unité de longueur.

Si, comme dans la plupart des cas, la gaine du câble est mise à la masse aux deux extrémités et le conducteur intérieur est terminé sur une impédance élevée, cela signifie que:

$$I_i \ll I_g$$

et donc,

$$I_g \approx I_s$$

Cela signifie que l'impédance de transfert sera donnée par:

$$Z_T(\omega) = \frac{E_i(\omega)}{I_s(\omega)}$$

L'impédance de transfert caractérise la qualité de blindage d'un câble. Elle est définie dans le domaine fréquentiel, avec  $\omega = 2 \pi f$ , où  $f$  est la fréquence.

L'admittance de transfert est la conséquence du couplage capacitif à travers les blindages à pertes et caractérise l'effet du champ électrique.

The internal reflection  $B$  is generally neglected. If the absorption is greater than 10 dB,  $B$  is very small.

## A.2 Transfer impedance theory

### A.2.1 Coupling mechanism through cable sheath

If a shielded cable is illuminated by an electromagnetic field, the electric and the magnetic field components will couple through the cable sheath and induce disturbing currents and voltages inside the cable. The magnetic field will induce a current  $I_s$  in the cable sheath. Moreover, in the case of braided cables, the electric and magnetic fields penetrating through apertures in the sheath will induce a voltage between the inner conductor and the sheath.

The magnetic field effect is usually the more important. The current  $I_s$  induced in the cable sheath divides into a part  $I_i$  returning into the inner conductor, and a part  $I_g$  which flows into a return conductor which can be the ground (see figure A.3). Therefore:

$$I_s = I_g + I_i$$

The circulation of these currents in the cable sheath will create an axial electric field inside the sheath. Due to the skin effect, the current and associated electric field distributions in the sheath cross-section are not uniform. If  $I_g$  is the current flowing on the sheath outer surface, the electric field  $E_i$  on the inner surface is produced by a much smaller current, the attenuation factor being expressed through the transfer impedance.

The complete analytical expression of the electrical field  $E_i$  has been introduced by Schelkunoff and is given by:

$$E_i = Z_{aa} I_i + Z_T I_g$$

where

$Z_{aa}$  is the outer surface impedance of the sheath; and

$Z_T$  is called the cable transfer impedance.

This value is defined per unit of length.

If, as in most cases, the cable sheath is grounded at the two ends and the inner conductor is terminated on a high impedance, it means that:

$$I_i \ll I_g$$

and hence,

$$I_g \approx I_s$$

This means that the transfer impedance will be given by:

$$Z_T(\omega) = \frac{E_i(\omega)}{I_s(\omega)}$$

The transfer impedance describes the shielding quality of the cable. It is defined in the frequency domain, with  $\omega = 2 \pi f$ , where  $f$  is the frequency.

The transfer admittance is caused by a capacitive coupling through leaky shields and describes the electric field effect.

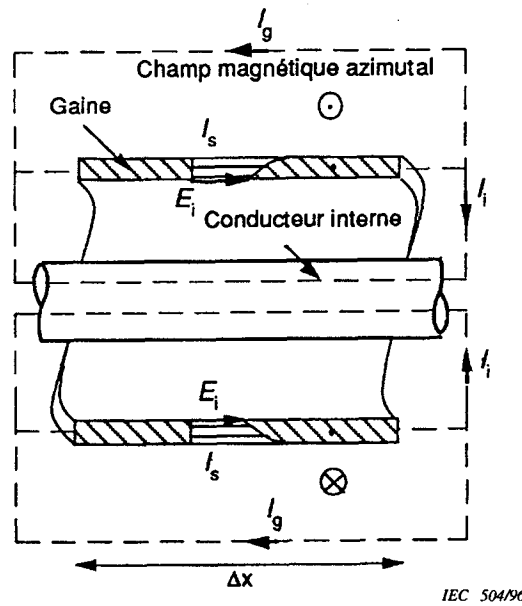


Figure A.3 – Définition de l'impédance de transfert

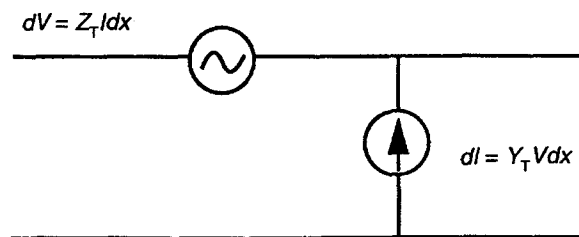
A.2.2 Définitions de l'impédance de transfert et de l'admittance de transfert

Comme défini précédemment,  $I_s$  est le courant de blindage et  $I_i$  le courant dans le conducteur interne;  $V_i$  est la tension induite entre le conducteur interne et la gaine, et  $V_s$  la tension entre la gaine et la masse. Alors les impédance et admittance de transfert peuvent être définies selon:

$$Z_T(\omega) = \frac{1}{I_s(\omega)} \frac{dV_i(\omega)}{dx} \quad I_i = 0$$

$$Y_T(\omega) = \frac{1}{V_s(\omega)} \frac{dI_i(\omega)}{dx} \quad V_i = 0$$

Ces équations correspondent au circuit équivalent de la figure A.4 dans laquelle  $dV_i(\omega)$  et  $dI_i(\omega)$  sont les sources distribuées de tension et de courant le long du câble blindé.



IEC 505/96

Figure A.4 – Circuit équivalent décrivant les effets de l'impédance de transfert et de l'admittance de transfert

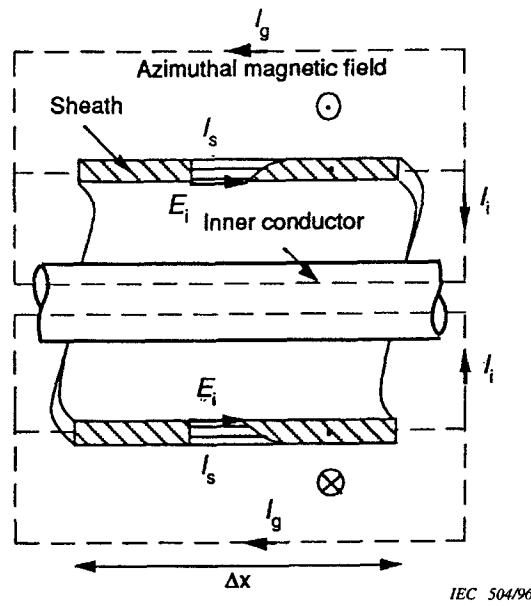


Figure A.3 – Transfer impedance definition

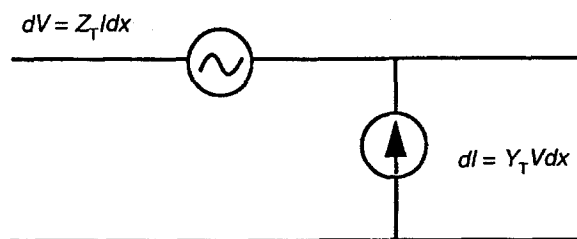
A.2.2 Transfer impedance and transfer admittance definitions

As defined previously,  $I_s$  is the shield current and  $I_i$  the current in the inner conductor;  $V_i$  is the voltage induced between the inner conductor and the sheath, and  $V_s$  the voltage between the sheath and the ground. Then the transfer impedance and admittance can be defined respectively as:

$$Z_T(\omega) = \frac{1}{I_s(\omega)} \frac{dV_i(\omega)}{dx} \quad I_i = 0$$

$$Y_T(\omega) = \frac{1}{V_s(\omega)} \frac{dI_i(\omega)}{dx} \quad V_i = 0$$

These equations correspond to the equivalent circuit of figure A.4 in which  $dV_i(\omega)$  and  $dI_i(\omega)$  are the distributed voltage and current sources along the shielded cable.



IEC 505/96

Figure A.4 – Equivalent circuit describing the effects of the transfer impedance and of the transfer admittance

### A.2.3 Impédance de transfert des blindages tressés

L'impédance de transfert d'un blindage tressé est donnée par la formule approximative:

$$Z_T = Z_d + j\omega L_t$$

$$\text{où } Z_d = \frac{4}{\pi d^2 N C \sigma \cos \alpha} \frac{(1+j) \frac{d}{\delta}}{\text{sh} \left[ (1+j) \frac{d}{\delta} \right]}$$

$$L_t = \frac{\pi \mu_0}{6C} (1-K)^{3/2} \lambda(\alpha)$$

où

$Z_d$  est le terme de diffusion;

$d$  est le diamètre de brin;

$C$  est le nombre de fuseaux;

$K$  est la couverture optique;

$\lambda(\alpha)$  est la fonction d'excentricité (voir figure A.5);

$\delta = 1/(\pi f \mu \sigma)^{1/2}$  (épaisseur de peau dans le blindage);

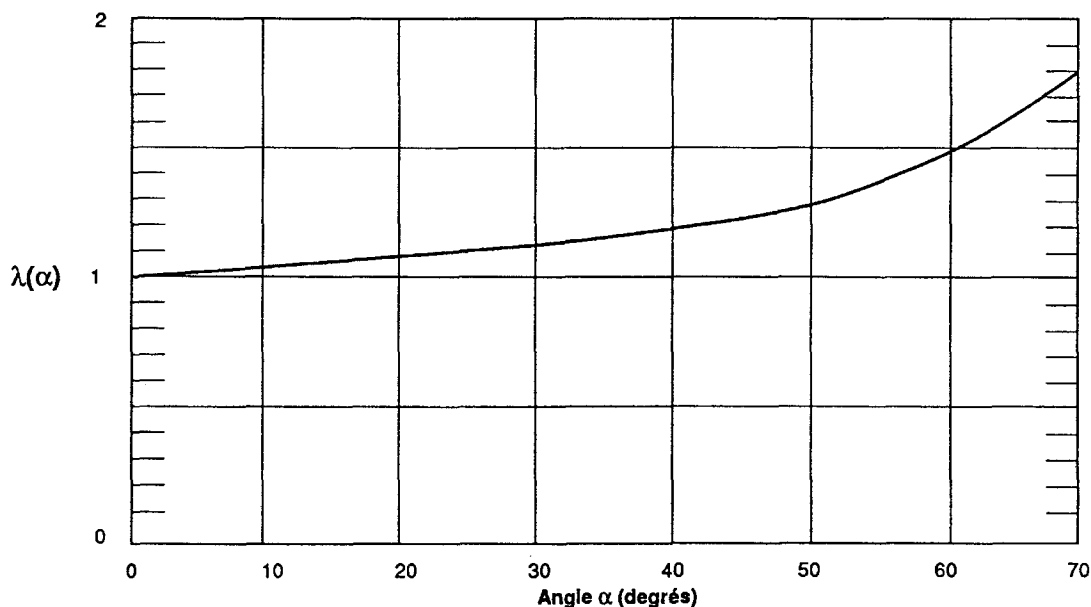
$L_t$  est le terme de mutuelle inductance;

$\alpha$  est l'angle de tissage;

$N$  est le nombre de brins par fuseau;

Le terme de diffusion  $Z_d$  est basé sur l'hypothèse que le blindage se comporte comme un blindage tubulaire ayant la même résistance en continu par unité de longueur que le blindage tressé, et les mêmes caractéristiques haute fréquence qu'un blindage tubulaire d'épaisseur égale au diamètre d'un fil. Le terme de mutuelle inductance est basé sur l'hypothèse que le blindage du câble tressé se comporte comme un blindage tubulaire mince ayant des trous elliptiques de même densité et d'axe principal et secondaire identique aux ouvertures rhombiques du blindage tressé.

NOTE – Le terme de diffusion  $Z_d$  indiqué est en fait exact pour un angle  $\alpha = 45^\circ$ , et il convient d'utiliser une autre formule plus précise si  $\alpha$  est différent de  $45^\circ$ .



IEC 506/96

Figure A.5 – Variation de la fonction d'excentricité pour les blindages tressés

### A.2.3 Transfer impedance of braided-wire shields

The transfer impedance of a braided-wire shield is given by the approximate formula:

$$Z_T = Z_d + j\omega L_t$$

$$\text{where } Z_d = \frac{4}{\pi d^2 N C \sigma \cos \alpha} \frac{(1+j) \frac{d}{\delta}}{\sinh \left[ (1+j) \frac{d}{\delta} \right]}$$

$$L_t = \frac{\pi \mu_0}{6C} (1-K)^{3/2} \lambda(\alpha)$$

where

- $Z_d$  is the diffusion term;
- $d$  is the strand diameter;
- $C$  is the number of carriers;
- $K$  is the optical coverage;
- $\lambda(\alpha)$  is the eccentricity function (see figure A.5);
- $\delta = 1/(\pi f \mu \sigma)^{1/2}$  (skin depth in the shield).
- $L_t$  is the mutual inductance term;
- $\alpha$  is the weave angle;
- $N$  is the number of strands per carrier;

The diffusion term  $Z_d$  is based on the assumption that the shield behaves as a tubular shield having the same d.c. resistance per unit length as the braided-wire shield, and the same high-frequency characteristics as a tubular shield one wire-diameter thick. The mutual inductance term is based on the assumption that the braided-wire shield behaves as a thin-walled tubular shield with elliptical holes of the same density and major and minor axes identical with the rhombic apertures in the braided-wire shield.

NOTE – The diffusion term  $Z_d$  is actually accurate for angle  $\alpha = 45^\circ$ , and a more precise alternative formula should be used if  $\alpha$  is different from  $45^\circ$ .

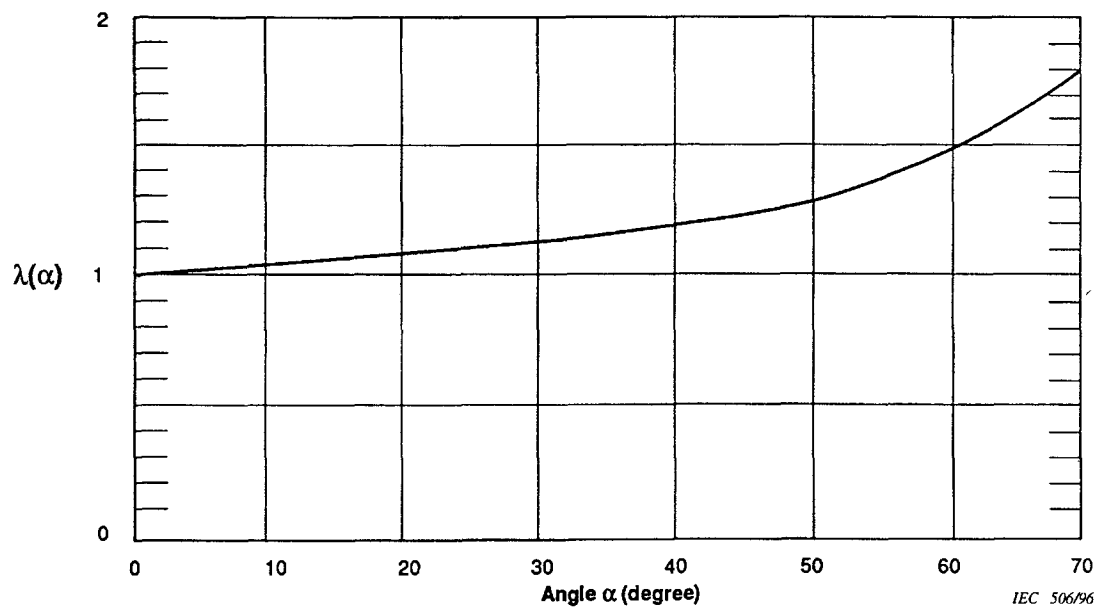


Figure A.5 – Variation of the eccentricity function for braided wire shields

#### A.2.4 Impédance de transfert de blindages à rubans hélicoïdaux

L'impédance de transfert d'un blindage à ruban hélicoïdal s'exprime par:

$$Z_T = R_0 \left[ \frac{(1+j)\frac{T}{\delta}}{\operatorname{sh}\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right]} + \left[ (1+j)\frac{T}{\delta} \coth\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right] + j\left(\frac{T}{\delta_0}\right)^2 \frac{a}{T} \right] \operatorname{tg}^2 \alpha \right]$$

où

$R_0$  est la résistance en continu par unité de longueur;

$a$  est le rayon du blindage;

$T$  est l'épaisseur du blindage;

$\delta$  est l'épaisseur de peau dans le blindage;

$\delta_0$  est l'épaisseur de peau d'un blindage équivalent non ferreux ( $\mu_0, \sigma$ );

$\alpha$  est l'angle de spirale ( $\operatorname{tg} \alpha = 2 \pi a N = 2 \pi a \sin \alpha / W$ );

$W$  est l'épaisseur du ruban;

$N$  est le nombre de tours par unité de longueur.

L'impédance de transfert d'un blindage à simple couche avec chevauchement est obtenue en remplaçant  $W$  par  $W - W_{ov}$ , où  $W_{ov}$  est la largeur de chevauchement. Aux fréquences basses ( $T/\delta \ll 1$ ), l'impédance de transfert est supérieure à celle qui correspond au type de blindage sans chevauchement, mais aux fréquences élevées, la capacité entre les tours court-circuite l'inductance de telle sorte que  $Z_T$  commence à décroître.

#### A.2.4 Transfer impedance of tape-wound shields

The transfer impedance of a tape-wound shield is expressed by:

$$Z_T = R_0 \left[ \frac{(1+j)\frac{T}{\delta}}{\sinh\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right]} + \left[ (1+j)\frac{T}{\delta} \coth\left[(1+j)\frac{T}{\delta}\right] + j\left(\frac{T}{\delta_0}\right)^2 \frac{a}{T} \right] \tan^2 \alpha \right]$$

where

$R_0$  is the d.c. resistance per unit length;

$a$  is the radius of the shield;

$T$  is the thickness of the shield;

$\delta$  is the skin depth in the shield;

$\delta_0$  is the skin depth for an equivalent non-ferrous shield ( $\mu_0, \sigma$ );

$\alpha$  is the spiral angle ( $\tan \alpha = 2 \pi a N = 2 \pi a \sin \alpha / W$ );

$W$  is the width of the tape;

$N$  is the number of turns per unit length.

The transfer impedance of a single-layer overlapped shield is obtained by replacing  $W$  by  $W - W_{ov}$ , where  $W_{ov}$  is the overlap width. At low frequencies where  $(T/\delta \ll 1)$ , the transfer impedance of the overlap type is larger than that of the non-overlap type, but at high frequencies, the capacitance between the turns shorts out the inductance so that  $Z_T$  begins to decrease.

**Annexe B/Annex B**  
(informative)

**Bibliographie/Bibliography**

Ott, H.W., *Noise Reduction techniques in electronic systems*, 2nd ed., Wiley Interscience, 1988.

Smith, Jr, A.A., *Coupling of external electromagnetic fields to transmission lines*, 2nd ed., ICT, 1989.

Degauque, P. Hamelin, J., *Compatibilité électromagnétique*, Dunod, 1990.

Cowdell, R.B., *New dimension in shielding*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-10, No. 1, March 1968.

*Transmission theory of plane electromagnetic waves*, Proceedings of IRE, Vol. 25, Nov. 1937.

Vance, E.F., *Coupling to shielded cables*, Robert E. Krieger Publishing Company, 1987.

Ecoles polytechniques fédérales de Lausanne et de Zurich, *Compatibilité électromagnétique*, 2<sup>e</sup> éd., Presses polytechniques romandes, 1985.

Schultz, R.B., Plantz, V.C., Brush, D.R., *Shielding theory and practice*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-30, Aug. 1988.

---

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE  
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

---

**ICS 33.100**

---