

RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT

CEI
IEC

TR 61000-5-3

Première édition
First edition
1999-07

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM
BASIC EMC PUBLICATION

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 5-3:

**Guides d'installation et d'atténuation –
Concepts de protection HEMP**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 5-3:

**Installation and mitigation guidelines –
HEMP protection concepts**



Numéro de référence
Reference number
IEC/TR 61000-5-3:1999

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

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

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 dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

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 in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT

CEI
IEC

TR 61000-5-3

Première édition
First edition
1999-07

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM
BASIC EMC PUBLICATION

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 5-3:

**Guides d'installation et d'atténuation –
Concepts de protection HEMP**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 5-3:

**Installation and mitigation guidelines –
HEMP protection concepts**

© IEC 1999 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	8
Articles	
1 Domaine d'application	10
2 Documents de référence	10
3 Définitions	12
4 Généralités	12
5 Principes de protection	14
5.1 Généralités	14
5.2 Zonage	14
5.3 Protection contre les perturbations rayonnées	16
5.4 Protection contre les perturbations conduites	16
5.5 Guides de câblage et d'installation	18
5.5.1 Points d'entrée	18
5.5.2 Principes de câblage	18
5.5.3 Câbles	20
5.6 Relation entre les principes de protection contre l'IEMN-HA et contre la foudre	20
5.6.1 Sources d'IEMN-HA et de foudre	22
5.6.2 Protections contre l'IEMN-HA et la foudre	22
5.6.3 Examen des deux types d'environnement	24
6 Sélection des composants	26
6.1 Sélection des composants du circuit	26
6.2 Sélection des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées	28
6.3 Sélection des dispositifs de protection contre les perturbations conduites	28
6.3.1 Généralités	28
6.3.2 Catégories de dispositifs	28
6.3.3 Protection d'interfaces de ligne types	36
7 Principes de protection	42
7.1 Considérations générales	42
7.2 Considérations topologiques	42
7.3 Définition des principes de protection	44
7.3.1 Principes de protection des bâtiments	44
7.3.2 Principes de protection des enceintes blindées	46
8 Comparaison entre les mesures de protection contre les perturbations conduites dues à l'IEMN-HA et les impulsions électromagnétiques dues à la foudre (IEMF)	48
8.1 Généralités	48
8.2 Courant de crête $\hat{i}$	48
8.3 di/dt maximal	50
8.4 du/dt maximal	50
8.5 Intégrale $i \times dt$	50
8.6 Intégrale $i^2 \times dt$	50
8.7 Durée à mi-valeur	52
8.8 Conclusions sur la comparaison entre la protection IEMN-HA et la protection IEMF ..	52

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
INTRODUCTION	9
Clause	
1 Scope	11
2 Reference documents	11
3 Definitions	13
4 General	13
5 Protection principles	15
5.1 General	15
5.2 Zoning	15
5.3 Protection against radiated disturbance	17
5.4 Protection against conducted disturbance	17
5.5 Wiring and installation guidelines	19
5.5.1 Points of entry	19
5.5.2 Wiring concepts	19
5.5.3 Cables	21
5.6 Relation between HEMP and lightning protection principles	21
5.6.1 HEMP and lightning sources	23
5.6.2 HEMP and lightning protections	23
5.6.3 Discussion on the two types of environment	25
6 Component selection	27
6.1 Selection of circuit components	27
6.2 Selection of protective devices against radiated disturbance	29
6.3 Selection of protective devices against conducted disturbance	29
6.3.1 General	29
6.3.2 Device categories	29
6.3.3 Protection of typical line interfaces	37
7 Protection concepts	43
7.1 General considerations	43
7.2 Topological considerations	43
7.3 Definition of protection concepts	45
7.3.1 Building protection concepts	45
7.3.2 Protection concepts for shielded enclosures	47
8 Comparison of protection measures against conducted disturbances due to HEMP and lightning electromagnetic pulse (LEMP)	49
8.1 General	49
8.2 Peak current $\hat{i}$	49
8.3 Maximum di/dt	51
8.4 Maximum du/dt	51
8.5 Integral $i \times dt$	51
8.6 Integral $i^2 \times dt$	51
8.7 Time to half-value	53
8.8 Conclusions on the comparisons between HEMP and LEMP protection	53

Pages

Annexe A Environnements de rayonnement dus à l'IEMN-HA initiale et à la foudre.....	54
Annexe B Installation montrant l'utilisation d'un transformateur de répartition avec enroulement primaire connecté en triangle	74
Annexe C Caractéristiques des mesures de protection du point de vue des transmissions...	76
Figure 1 – Exemple de pénétrations de perturbations rayonnées et conduites à travers une double barrière de protection	14
Figure 2 – Tension et intensité traversant un parafoudre à gaz pendant une onde de choc	18
Figure 3 – Principes de câblage.....	20
Figure 4 – Circuit de protection type.....	34
Figure 5 – Dispositif empêchant le rayonnement du courant de choc dans la zone protégée ..	52
Tableau 1 – Principes de protection des bâtiments.....	44
Tableau 2 – Principes de protection des enceintes blindées	46
Tableau 3 – Formes d'ondes de courant de foudre et d'IEMN-HA utilisables pour des essais.	48

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-5-3:1999

	Page
Annex A Early-time HEMP and lightning radiated environments.....	55
Annex B Arrangement showing the use of a distribution transformer with a primary delta winding	75
Annex C Transmission characteristics of protective measures	77
Figure 1 – Example of penetration of radiated and conducted disturbances through a two-barrier protection.....	15
Figure 2 – Voltage and current flowing through a gas arrester during a surge event.....	19
Figure 3 – Concepts for wiring systems.....	21
Figure 4 – Typical protection circuit.....	35
Figure 5 – Solution to prevent surge current from radiating into protected area.....	53
Table 1 – Building protection concepts.....	45
Table 2 – Protection concepts for shielded enclosures	47
Table 3 – Lightning and HEMP current waveforms which can be used for tests.....	49

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-5-3:1999

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 5-3: Guides d'installation et d'atténuation – Concepts de protection IEMN-HA

AVANT-PROPOS

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

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il 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.

Un rapport technique ne doit pas nécessairement être révisé avant que les données qu'il contient ne soient plus jugées valables ou utiles par le groupe de maintenance.

La CEI 61000-5-3 qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 77C: Immunité à l'impulsion électromagnétique nucléaire à haute altitude (IEMN-HA), du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique.

Elle a le statut de publication fondamentale en CEM conformément au Guide 107 de la CEI.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
77C/58/CDV	77C/69/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.

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

Ce document, purement informatif, ne doit pas être considéré comme une Norme internationale.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –**Part 5-3: Installation and mitigation guidelines –
HEMP protection concepts**

FOREWORD

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

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it 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 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful by the maintenance team.

IEC 61000-5-3, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 77C: Immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP), of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

It has the status of a basic EMC publication in accordance with IEC Guide 107.

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

Enquiry draft	Report on voting
77C/58/CDV	77C/69/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 publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC directives, Part 3.

This document, which is purely informative is not to be regarded as an International Standard.

INTRODUCTION

La CEI 61000-5 fait partie de la série de normes 61000 de la CEI, selon la répartition suivante:

Partie 1: Généralités

Considérations générales (introduction, principes fondamentaux)

Définitions, terminologies

Partie 2: Environnement

Description de l'environnement

Classification de l'environnement

Niveaux de compatibilité

Partie 3: Limites

Limites d'émission

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

Partie 4: Techniques d'essai et de mesure

Techniques de mesure

Techniques d'essai

Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation

Guide d'installation

Méthodes et dispositifs d'atténuation

Partie 6: Normes génériques

Partie 9: Divers

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-5-3:1999

INTRODUCTION

IEC 61000-5 is a part of the IEC 61000 series, according to the following structure:

Part 1: General

General considerations (introduction, fundamental principles)

Definitions, terminology

Part 2: Environment

Description of the environment

Classification of the environment

Compatibility levels

Part 3: Limits

Emission limits

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

Part 4: Testing and measurement techniques

Measurement techniques

Testing techniques

Part 5: Installation and mitigation guidelines

Installation guidelines

Mitigation methods and devices

Part 6: Generic standards

Part 9: Miscellaneous

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-5-3:1999

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 5-3: Guides d'installation et d'atténuation – Concepts de protection IEMN-HA

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61000 définit et donne des informations sur les principes de protection contre les impulsions électromagnétiques dues aux explosions nucléaires à haute altitude et désignées ci-après par IEMN-HA.

L'objet de ce rapport technique est de fournir des éléments permettant

- de mettre au point un système de protection adéquat des bâtiments publics contre l'IEMN-HA;
- d'évaluer les systèmes de protection existants en tenant compte des contraintes imposées par l'IEMN-HA;
- de comparer les spécifications de protection contre la foudre et contre l'IEMN-HA pour déterminer si elles peuvent être combinées à faible coût;
- de souligner les différences entre les prescriptions de protection contre l'IEMN-HA et les prescriptions de protection contre la foudre pour permettre d'évaluer les conséquences de l'IEMN-HA quand aucune mesure de protection supplémentaire n'est prise, hormis celles concernant la foudre.

2 Documents de référence

CEI 60050(161):1990, *Vocabulaire électrotechnique international (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

CEI 60060-2:1994, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*

CEI 60099-1:1991, *Parafoudres – Partie 1: Parafoudres à résistance variable avec éclateurs pour réseaux à courant alternatif*

CEI 61000-2-9:1996, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2: Environnement-Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations radiantes*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-2-10:1998, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-10: Environnement – Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations conduites*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-2-11, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-11: Environnement – Classification de l'environnement IEMN-HA*¹⁾

CEI 61000-4-5:1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 5: Essai d'immunité aux ondes de choc*

¹⁾ A publier.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 5-3: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection concepts

1 Scope

This part of IEC 61000 defines and gives information on protection concepts against electromagnetic pulse due to a high altitude nuclear explosion (denoted in what follows by the abbreviation HEMP).

The aim of this technical report is to provide elements for

- the design of an adequate protection for civil facilities against HEMP;
- the evaluation of already existing protections with respect to stresses imposed by HEMP;
- the comparison of the requirements of HEMP and lightning protection in order to show if they can be combined at low cost;
- an emphasis of the differences between the requirements of HEMP and lightning protection in order to permit an evaluation of the consequences of HEMP when no additional measures are taken beyond existing lightning protection.

2 Reference documents

IEC 60050(161):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

IEC 60060-2:1994, *High voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

IEC 60099-1:1991, *Surge arresters – Part 1: Non-linear resistor type gapped arresters for a.c. systems*

IEC 61000-2-9:1996, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance*. Basic EMC publication

IEC 61000-2-10:1998, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance*. Basic EMC publication

IEC 61000-2-11, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Description of HEMP environment – Classification of HEMP environments* ¹⁾

IEC 61000-4-5:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 5: Surge immunity test*

¹⁾ To be published.

CEI 61000-4-23, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-23: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essais pour les dispositifs de protection pour les perturbations rayonnées IEMN-HA*. Publication fondamentale en CEM ¹⁾

CEI 61000-4-24:1997, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 24: Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection pour perturbations conduites IEMN-HA*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-4-25, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-25: Techniques d'essai et de mesure – Prescriptions IEMN-HA et méthodes d'essai pour l'équipement et les systèmes*. Publication fondamentale en CEM ¹⁾

CEI/TR 61000-5-4:1996, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation – Section 4: Immunité à l'IEMN-HA – Spécifications des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées dues à l'IEMN-HA*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61000-5-5:1996, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation – Section 5: Spécification des dispositifs de protection pour perturbations conduites IEMN-HA*. Publication fondamentale en CEM

CEI 61312-1:1995, *Protection contre l'impulsion électromagnétique générée par la foudre – Partie 1: Principes généraux*

3 Définitions

Pour les besoins du présent rapport technique, les définitions de la CEI 60050(161) ainsi que les définitions suivantes s'appliquent.

3.1

barrière électromagnétique

surface qui, d'un point de vue topologique, est close pour empêcher ou limiter l'entrée de champs électromagnétiques et de transitoires de conduction. La barrière est constituée par le traitement de la surface du blindage et des points d'entrée; elle enveloppe le volume protégé

3.2

pénétration

passage d'énergie électromagnétique d'un volume dans un autre à travers une barrière électromagnétique, qui peut se faire de différentes façons: diffusion à travers la barrière, par les ouvertures et par les conducteurs reliant les deux volumes (fils, câbles, conduites, tuyauteries, canalisations, etc.)

4 Généralités

L'IEMN-HA est étudiée, d'un point de vue environnemental, à l'article 3 de la CEI 61000-2-9 et de la CEI 61000-2-10.

L'étude des principes de protection entraîne l'examen des procédures de blindage des bâtiments, des matériels et de leurs interconnexions (lignes et câbles de transmission). Le terme «blindage» est utilisé ici dans son sens le plus général, c'est-à-dire cages, armoires, câbles blindés, filtres et parasurtenseurs.

¹⁾ A publier.

IEC 61000-4-23, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbance*. Basic EMC publication ¹⁾

IEC 61000-4-24:1997, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbances*. Basic EMC publication.

IEC 61000-4-25, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP requirements and test methods for equipment and systems*. Basic EMC Publication ¹⁾

IEC/TR 61000-5-4:1996, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 4: Immunity to HEMP – Specification for protective devices against HEMP radiated disturbance*. Basic EMC Publication

IEC 61000-5-5:1996, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance*. Basic EMC Publication

IEC 61312-1:1995, *Protection against lightning electromagnetic impulse – Part 1: General principles*

3 Definitions

For the purpose of this technical report, the definitions of IEC 60050(161) together with the following definitions apply.

3.1

electromagnetic barrier

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

3.2

penetration

transfer of electromagnetic energy through an electromagnetic barrier from one volume to another. This can take place in different ways: by diffusion through the barrier, through apertures and through conductors connecting the two volumes (wires, cables, conduits, pipes, ducts, etc.)

4 General

The subject of HEMP is covered from an environmental point of view in clause 3 of IEC 61000-2-9 and IEC 61000-2-10.

The discussion of the protection concepts refers to shielding procedures for buildings, equipments and connections between them (transmission lines and cables). The term "shielding" is used here in its more general sense, i.e. cages, cabinets, shielded cables, filtering and surge suppressors.

¹⁾ To be published.

5 Principes de protection

5.1 Généralités

Ce paragraphe traite des principes généraux de protection appliqués pour la plupart des méthodes de protection définies à l'article 7.

Dans les zones protégées (bâtiments, installations, systèmes ou matériels), deux grandes sources de perturbations sont à prévoir: le rayonnement électromagnétique direct (perturbations rayonnées) et la pénétration par conduction de surtensions et de surintensités (perturbations conduites) (voir figure 1).

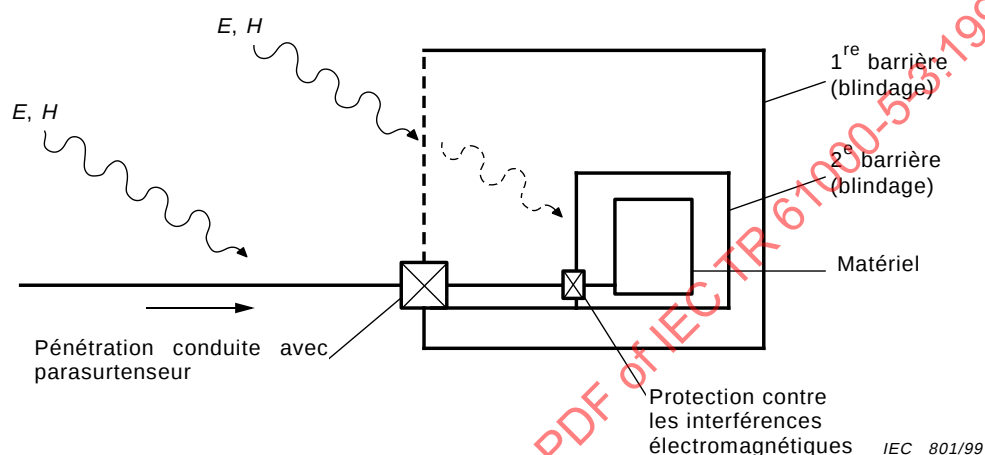


Figure 1 – Exemple de pénétrations de perturbations rayonnées et conduites à travers une double barrière de protection

La figure 1 montre un exemple d'installation protégée par deux barrières. Les perturbations rayonnées peuvent être atténuées par des éléments de construction (béton, barres nervurées et autres éléments métalliques, etc.) ou par la mise en place de blindages métalliques spécialement prévus à cet effet. La protection contre les perturbations conduites pénétrant par les lignes entrantes ou sortantes peut être obtenue par la mise en court-circuit momentanée de la ligne allant vers le blindage, par la réduction de la largeur de la bande de fréquences ou par l'association de ces deux méthodes (parasurtenseurs et filtres, par exemple). De nombreux bâtiments sont déjà équipés de cette façon pour se protéger de la foudre. Comme indiqué plus loin, on doit vérifier qu'ils répondent, au moins en partie, à la nécessité de se protéger contre l'IEMN-HA. Les parasurtenseurs sont des éléments non linéaires. Au-dessous d'une certaine tension, leur résistance se trouve dans la plage des mégohms; à l'état passant, elle peut devenir inférieure à 1 mΩ. L'efficacité des parasurtenseurs ne peut donc ni être exprimée en décibels ni être directement comparée à l'efficacité du blindage. Les pertes d'insertion d'un filtre de ligne et l'atténuation de rayonnement d'un écran correspondent également à deux phénomènes très différents. Il convient cependant de souligner que, si la tension (ou énergie) résiduelle d'une ligne dans la zone protégée est comparable à la tension (ou énergie) pouvant être induite sur cette ligne par les champs qui pénètrent à travers le blindage, toute réduction supplémentaire de la tension (ou énergie) conduite n'apportera pas d'amélioration notable.

5.2 Zonage

Dans un système très étendu dans l'espace, il est parfois souhaitable de définir des zones présentant des niveaux de perturbation différents, cela parce que certaines parties du système ne sont pas essentielles et n'ont donc pas besoin d'être protégées ou parce qu'elles sont moins sensibles que d'autres. Un zonage correct implique que dans une zone donnée, il y ait une protection suffisante contre la pénétration pour que la perturbation résiduelle conduite et la perturbation rayonnée soient comparables et qu'aucune ne soit plus élevée. Le paragraphe 5.2 de la CEI 61000-5-6 définit le zonage et classe les zones de protection d'un point de vue de la CEM. Cette comparaison n'est réalisable que si on compare la sensibilité d'un matériel donné

5 Protection principles

5.1 General

This subclause deals with general protection principles that can be applied to most of the protection concepts as defined in clause 7.

In protected areas (buildings, installations, systems or equipment), two main sources of disturbance – direct electromagnetic radiation (radiated disturbance) and conducted penetration of voltage and current surges (conducted disturbance) – are foreseen (see figure 1).

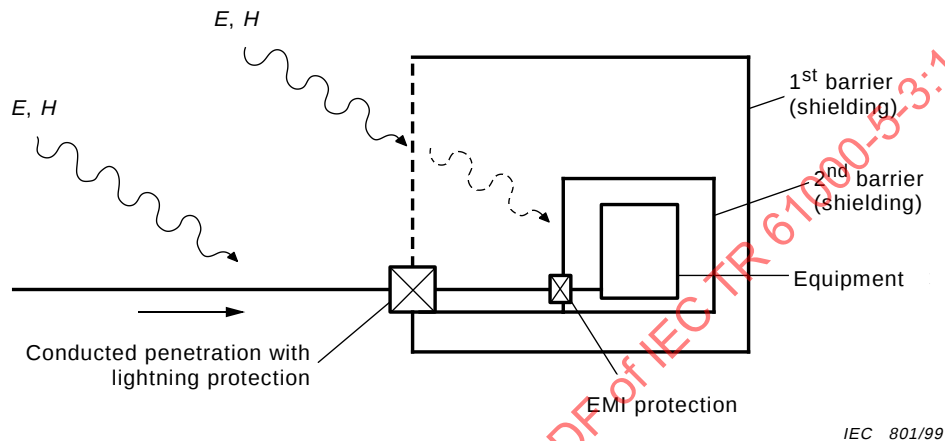


Figure 1 – Example of penetration of radiated and conducted disturbances through a two-barrier protection

This figure shows an example of an installation protected by two barriers. The radiated disturbance may be attenuated by construction elements of buildings (concrete, rebars and other metal parts, etc.) or by metal shields installed specifically for this purpose. Protection against conducted disturbances penetrating via incoming and outgoing lines may be achieved by momentarily short-circuiting the line to the shield, by frequency bandwidth limitation or by combinations of both (e.g. surge protectors plus filters). Very often, such protection already exists in many buildings against lightning. As discussed below, a check shall be performed to decide if the lightning protection complies at least partially with the needs for protection against HEMP. Surge protectors are extremely non-linear elements. Below a certain voltage, their resistance is in the megohm range but during conduction it may be down to less than 1 mΩ. Their effectiveness cannot therefore be expressed in decibels or directly compared to shield effectiveness. The insertion loss of a line filter and the radiation attenuation of a shield also describe two completely different items. Nevertheless, it should be noted that, when the residual voltage (or energy) on a line in the protected area is comparable to the voltage (or energy) that can be induced on the line by fields penetrating the shield, further reduction of the conducted voltage (or energy) will not be very beneficial.

5.2 Zoning

In a spatially extended system, it may be advisable to define zones of different disturbance levels. One reason for this may be that parts of the system are not essential and therefore do not need to be protected, or that some parts of the system are not as susceptible as others. Correct zoning implies that sufficient penetration protection be applied to make the residual conducted disturbance comparable to the radiated disturbance within a zone, so that conducted interference is not a dominant disturbance within the zone. A definition of zoning and a classification of protection zones from an EMC point of view is given in 5.2 of IEC 61000-5-6. This comparison can be performed only by comparing the susceptibility of a

à chaque type de perturbation. La susceptibilité du matériel peut être déterminée à l'aide d'essais spécifiques décrits dans la CEI 61000-4-25, mais la comparaison n'est pas facile car le matériel peut être plus ou moins sensible à un type de perturbation.

La limite d'une zone est définie par une structure mécanique (mur en béton, structure nervurée ou blindage métallique plein) permettant une certaine atténuation du rayonnement dont la valeur par rapport au degré de protection est définie à l'article 7. Les lignes traversant les limites entre les zones doivent être protégées contre les perturbations conduites à tous les points d'entrée. Si une ligne traverse plusieurs frontières, les dispositifs de protection doivent être coordonnés conformément aux indications de 6.3.3.6. Si le blindage est imparfait, c'est-à-dire si son atténuation moyenne est inférieure à 40 dB entre 14 kHz et 1 GHz environ (voir également la CEI 61000-5-4), on doit vérifier que les courants de blindage ne rayonnent pas dans la zone et ne créent pas de chutes de tension inductives entre les différents points d'entrée. Dans ce cas, il est préférable d'avoir un seul point d'entrée (point d'entrée unique) par zone.

5.3 Protection contre les perturbations rayonnées

Un des rôles d'un blindage est d'atténuer le rayonnement en champ libre et d'empêcher la pénétration du rayonnement dû aux courants de ligne et de blindage dans la zone protégée. Ce dernier point est très important dans le cas de blindages imparfaits. Les structures mécaniques telles que les murs en béton, les treillis métalliques et les éléments de construction métalliques peuvent contribuer à l'atténuation totale de champ si elles sont correctement intégrées dans un concept de protection multiple. L'utilisation optimale de ces structures n'est possible qu'à condition qu'il existe une séparation spatiale entre les blindages et que les lignes pénétrantes (et les raccordements à la terre) ne pénètrent dans le blindage que par un seul point. Il n'existe pas d'autre moyen pour empêcher les courants de ligne de pénétrer et de s'écouler à travers les zones protégées (voir figure 1).

5.4 Protection contre les perturbations conduites

Les dispositifs de protection doivent satisfaire à deux exigences souvent contradictoires. En cas de surtension (due à la foudre ou à l'IEMN-HA), ils doivent protéger le matériel auquel ils sont raccordés soit par interruption de la voie longitudinale, soit en mettant la voie transversale en court-circuit. En l'absence de surtension, il convient qu'ils influencent le moins possible le fonctionnement normal du matériel. Il convient que le passage d'un état à l'autre n'excède pas quelques nanosecondes.

L'apparition d'un transitoire à un dispositif protecteur peut être décrite en termes de tension et de courant en fonction du temps. La figure 2 illustre un exemple de parafoudre à gaz. Pendant la première phase de la surtension, quand la tension augmente, l'élément de protection (primaire) reste non conducteur. A ce stade, le dispositif n'est traversé par aucun courant élevé et la surtension peut être traitée en ne tenant compte que de la tension de claquage du matériau diélectrique de l'élément de protection, et sans tenir compte du courant. Ce n'est que lorsque la tension atteint le niveau limite que du courant commence à circuler dans l'élément protecteur et qu'on doit prendre en compte le phénomène thermique décrit en termes d'action,

c'est-à-dire proportionnel à $\int_{t_i}^{t_f} i^2 dt$,

t_i étant le temps initial du phénomène, et

t_f étant le temps final du phénomène.

Avant de choisir un dispositif de protection, on doit répondre aux questions suivantes.

- quelle est la fréquence des perturbations (foudre)?
- quels sont les paramètres prévisibles des surtensions (dus à la foudre et à l'IEMN-HA)?
- quelle est la tension résiduelle maximale pour chaque forme d'onde qui est admissible par le matériel connecté à l'interface ?

given equipment to each kind of disturbance. The susceptibility of the equipment can be determined by specific tests described in IEC 61000-4-25, but the comparison is not straightforward because the equipment can be more or less susceptible to one type of disturbance.

The boundary of a zone is defined by a mechanical structure (concrete building wall, rebar structure or solid metal shield) that has a certain radiation attenuation whose magnitude as a function of the degree of protection is defined in clause 7. Lines penetrating zone boundaries shall be protected against conducted disturbance at every point of entry. If a line penetrates several boundaries, the protective devices shall be coordinated as described in 6.3.3.6. In imperfect shields, i.e. shields with an average attenuation of less than 40 dB from about 14 kHz to 1 GHz (see also IEC 61000-5-4), special care shall be taken that shield currents do not radiate into the zone and do not produce inductive voltage drops between the different points of entry. In such a case, it is advisable to have only one point of entry (single point entry) per zone.

5.3 Protection against radiated disturbance

One function of a shield is to attenuate free-field radiation and to prevent radiation from line currents and shield currents from entering the protected area. This is an important issue for imperfect shields. Mechanical structures such as concrete walls, rebar meshes and metallic structural elements may contribute to the total field attenuation if properly integrated in a multi-shield concept. Optimal use of these structures can only be made if each shield is spatially separated from each other and penetrating lines (and ground connections) enter the shields only at one point per shield. Only by this means can line currents be prevented from flowing into and across protected areas (see figure 1).

5.4 Protection against conducted disturbance

Protective devices shall fulfil two often contradictory requirements. During a surge event (lightning or HEMP) they shall protect the connected equipment either by insulating the longitudinal path or by short-circuiting the transversal path. In the absence of a surge, they should influence the normal operation of the equipment as little as possible. The transition between the two stages should happen within a few nanoseconds or less.

A surge event in a protective device can be described in terms of voltage or current as a function of time. Figure 2 shows an example using a gas arrester. During the first phase, as the voltage rises, the (primary) protection element is still in its insulating state. In this phase, no significant current flows through the device and the event can be treated considering only the breakdown voltage of the dielectric material of the protection element. It is only when the voltage reaches the breakdown or limiting level that a current starts to flow through the protection element and that the thermal process described in terms of action, i.e. proportional

to $\int_{t_i}^{t_f} i^2 dt$, shall be taken into account,

t_i being the initial time of the phenomenon, and

t_f being the final time of the phenomenon.

Prior to choosing protective devices, the following questions shall be answered:

- how often do disturbances (lightning) occur?
- which surge parameters are expected (from lightning and HEMP)?
- what is the maximum residual voltage for each waveform that the equipment connected at the interface can withstand?

- quelle est la fonction du matériel ou de l'interface connecté ? – Quels sont les éléments parasites (impédance longitudinale, perte d'insertion, capacité etc.) du dispositif de protection qui sont admissibles sans perturber le fonctionnement normal?

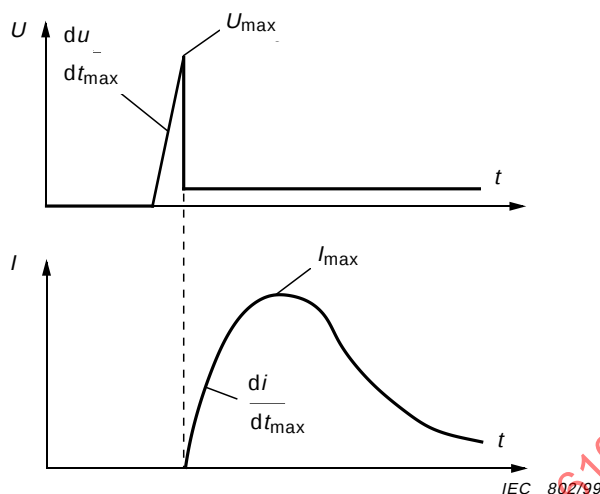


Figure 2 – Tension et intensité traversant un parafoudre à gaz pendant une onde de choc

La formulation des prescriptions ou des spécifications des différents dispositifs de protection doit tenir compte des caractéristiques de fonctionnement propres à chacun d'eux. Il serait, par exemple, absurde d'exiger qu'une varistance ait une tension d'amorçage déterminée ou qu'un parafoudre à gaz ait une capacité minimale d'absorption d'énergie.

5.5 Guides de câblage et d'installation

5.5.1 Points d'entrée

Etant donné les nombreux points d'entrée d'un blindage imparfait, les chutes de tension induites dues aux courants de choc circulant sur le blindage peuvent se coupler dans la zone protégée et ainsi contourner les mesures de protection contre les perturbations conduites. L'existence de nombreuses mises à la terre à l'intérieur d'un blindage imparfait augmente le couplage en mode commun du reste du champ rayonné restant au système. Il est donc recommandé d'avoir un point d'entrée unique pour tous les câbles, ce qui signifie qu'il convient que toutes les mesures de protection des câbles entrants se trouvent sur le blindage et soient le plus près possible les unes des autres. Cela signifie aussi que le potentiel de terre de tous les matériels installés dans la zone protégée provient exclusivement du point d'entrée unique. Les dispositions de 5.6 présupposent l'existence d'un seul point d'entrée et d'une seule mise à la terre; elles présupposent également que les boîtiers des équipements sont isolés du bâtiment (barres nervurées, éléments de construction métalliques, etc.).

5.5.2 Principes de câblage

Les figures 3a et 3b illustrent deux principes de câblage entre le point d'entrée et les matériels.

Dans un système de câblage maillé (voir figure 3a), les connexions à l'intérieur du blindage peuvent être installées d'une manière arbitraire, ce qui ferait apparaître des boucles d'induction. Les champs entrants induisent dans les boucles de câblage des tensions et des courants qui peuvent détériorer le système. Il convient donc que cette méthode ne soit utilisée qu'avec des blindages pratiquement parfaits où les intensités de champ sont très faibles et/ou avec des câbles blindés ou de gaines de câbles blindées. Il convient cependant de noter que des boucles de grande dimension peuvent amener des équipements situés à l'intérieur d'une enveloppe blindée à se perturber mutuellement.

- what is the function of the connected equipment or interface?
which parasitic characteristics (longitudinal impedance, insertion loss, capacity, etc.) of the protective device are allowed that do not disturb normal operation ?

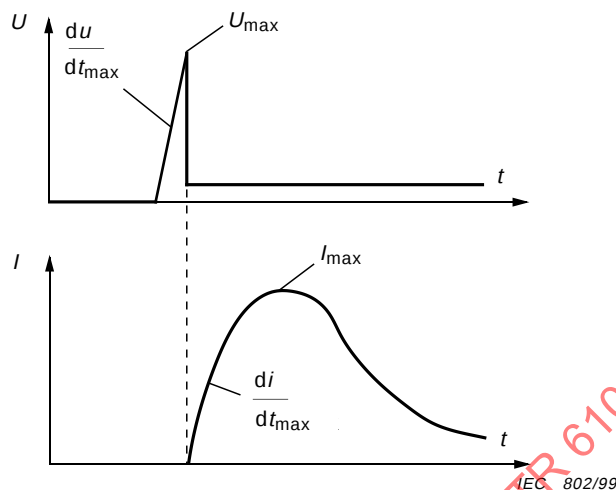


Figure 2 – Voltage and current flowing through a gas arrester during a surge event

As different protective devices may function in different ways, the requirements or specifications for each device type shall be formulated in a manner appropriate to its functioning. For instance, it would not make sense to require a specific firing voltage for a varistor or a minimum energy absorbance for a gas arrester.

5.5 Wiring and installation guidelines

5.5.1 Points of entry

With multiple points of entry into an imperfect shield, inductive voltage drops caused by surge currents flowing on the shield may couple into the protected area and thus by-pass the conducted protective measures. Multiple grounding points inside an imperfect shield increase common mode coupling of the remaining radiation field to the system. It is therefore advantageous to have a single entry point for all cables. This means that all protective measures for penetrating cables should be located on the shield and as close together as possible. This also means that ground potential for all equipment within the protected area should be taken exclusively from the location of the single entry point. In 5.6 it is assumed that only a single point entry and single point grounding are used, and that the equipment housings are insulated from the building (rebars, metallic construction parts, etc.).

5.5.2 Wiring concepts

Two basic concepts for wiring between the point of entry and the internal equipment are shown in figures 3a and 3b.

In a mesh-shaped wiring system (see figure 3a), the shield's internal connections can be installed arbitrarily, permitting induction loops. Penetrating fields induce voltages and currents in wiring loops that may affect the system. Therefore, this concept should only be used with nearly perfect shields where field intensities are low and/or with shielded cables or shielded cable ducts. It should be noted, however, that large loops may lead to mutual interference between equipment in a shielded enclosure.

Un circuit de câblage en étoile (voir figure 3b) ne contient que des boucles de surface très réduite. Le champ pénétrant ne peut induire que des signaux en mode commun auxquels le circuit est moins sensible (les signaux transitant sur les lignes et la terre du système ont la même amplitude et la même phase). Cette méthode de câblage est préférable pour les blindages à faible atténuation. En cas d'utilisation de câbles blindés et/ou de caniveaux de câbles métalliques de très bonne qualité, les exigences concernant l'atténuation assurée par le blindage peuvent être moins sévères.

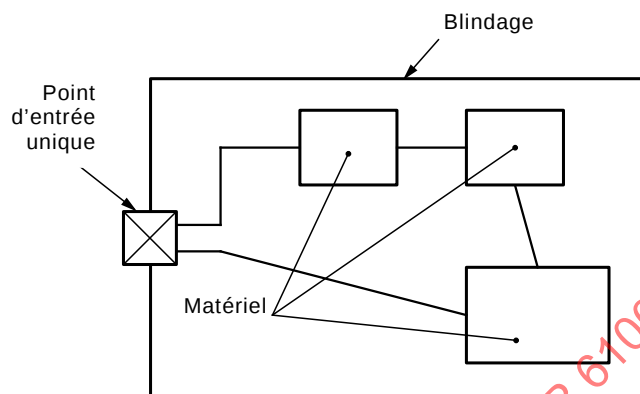
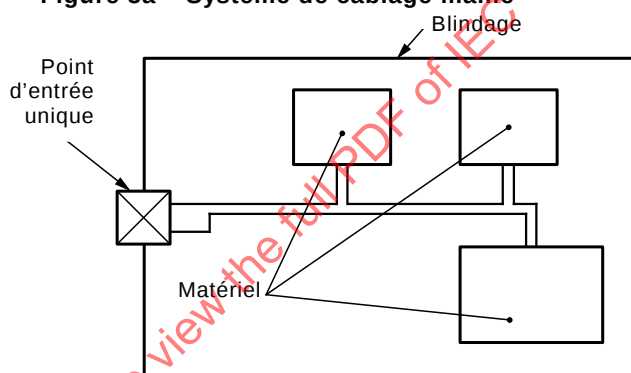


Figure 3a – Système de câblage maillé

IEC 803/99



IEC 804/99

Figure 3b – Système de câblage en étoile

Figure 3 – Principes de câblage

5.5.3 Câbles

En cas d'utilisation de câbles blindés ou de canalisations de câbles blindées, il est nécessaire d'interconnecter les blindages entre les différentes parties, que le circuit soit maillé ou en étoile. Le châssis des équipements doit également être relié au blindage des câbles. Il est fortement recommandé de veiller à la continuité du blindage en utilisant des connecteurs de bonne qualité aux points d'entrée des câbles dans les équipements et d'éviter les «queues de cochon» qui sont, en pratique, inefficaces du point de vue de la CEM. Les queues de cochon ne peuvent assurer que la protection des personnes en cas de court-circuit de l'alimentation à basse tension (et à fréquence industrielle 50 Hz ou 60 Hz) à la gaine du câble.

5.6 Relation entre les principes de protection contre l'IEMN-HA et contre la foudre

L'IEMN-HA et la foudre ont des causes très différentes mais leurs environnements de rayonnement et de conduction sont très semblables. Les principes de protection contre l'IEMN-HA des applications civiles doivent donc utiliser les dispositifs de protection contre la foudre déjà en place. Le concepteur d'un dispositif de protection contre l'IEMN-HA doit estimer si, compte tenu d'un certain risque, il peut conclure qu'un parafoudre assure également une protection suffisante contre l'IEMN-HA. Ce paragraphe examine les caractéristiques de base de l'environnement de l'IEMN-HA et de la foudre pour définir une stratégie de protection des équipements.

A tree-shaped wiring system (see figure 3b) contains only loops with a very small area. The penetrating field may induce only common-mode signals to which the system is less susceptible (the signals on the lines and on the system ground are of the same magnitude and phase). This wiring concept is preferably used within low attenuation shields. If high quality shielded cables and/or metal cable ducts are used, the requirement for shield attenuation may be further reduced.

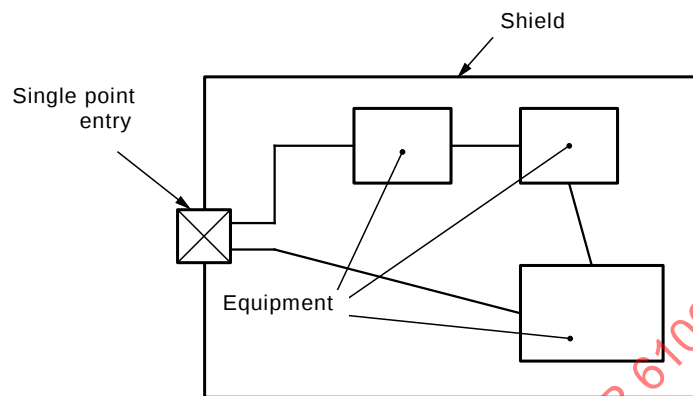
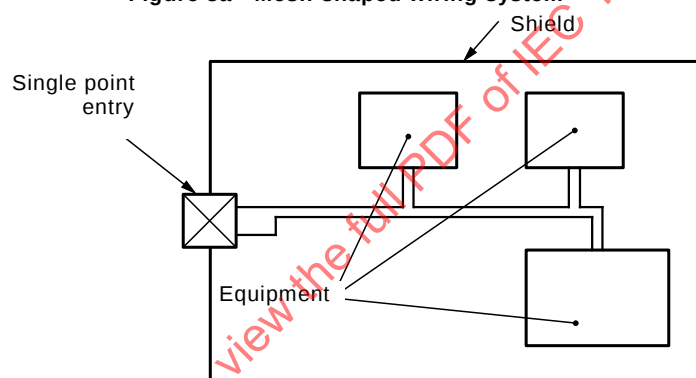


Figure 3a - Mesh-shaped wiring system

IEC 803/99



IEC 804/99

Figure 3b - Tree-shaped wiring system

Figure 3 - Concepts for wiring systems

5.5.3 Cables

If shielded cables or shielded cable ducts are used, the shields shall be interconnected between the sections, whether they are in a tree- or mesh-shaped configuration. The equipment chassis shall also be connected to the shields of the cables. It is highly advisable to implement the concept of shielding continuity, i.e. to use good quality connectors for the entry points of the cables into the equipment and to avoid pigtailed which are, in practice, ineffective from an EMC point of view. The pigtailed can provide only a protection for persons in case of short circuits of the mains (at power frequency 50 Hz or 60 Hz) to a cable sheath.

5.6 Relation between HEMP and lightning protection principles

From the source point of view, lightning and HEMP are quite different but the radiated and conducted environments produced by the two phenomena are very similar. Thus, HEMP protection principles for civil applications shall take advantage of already installed lightning protection. The designer of the HEMP protection shall estimate if, by admitting a certain risk, the lightning protection can also be considered to be sufficient against HEMP as well. The aim of this subclause is to discuss basic features of the HEMP and lightning environments in order to define a strategy for protecting the equipment.

5.6.1 Sources d'IEMN-HA et de foudre

Les effets de la foudre sont dus aux courants du premier arc en retour et des arcs en retour subséquents. Ces courants peuvent frapper directement une ligne, un matériel, une installation ou un bâtiment et, dans ce cas, constituent l'environnement primaire de conduction de la foudre. Si la foudre ne frappe pas directement certaines parties d'une installation, le courant de foudre crée un champ électromagnétique qui constitue l'environnement rayonné de foudre. Ce champ induira des tensions et des courants dans les circuits voisins, créant un environnement secondaire de conduction de la foudre.

Les conséquences de l'IEMN-HA sont essentiellement dues au champ électromagnétique rayonné qui, par couplage avec des lignes de transmission ou différents types de circuits, crée des tensions et des courants constituant l'environnement conduit IEMN-HA.

5.6.2 Protections contre l'IEMN-HA et la foudre

Les principes de protection contre l'IEMN-HA et contre la foudre sont différents. L'environnement rayonné et l'environnement conduit nécessitent des approches différentes.

5.6.2.1 Environnement rayonné

Comme indiqué à l'article 7, il convient que l'atténuation que l'on atteint à l'aide d'une cage blindée soit assez élevée pour protéger tout équipement vital contre l'IEMN-HA. En règle générale, les cages blindées ne sont pas utilisées pour la protection contre les champs électromagnétiques rayonnés par la foudre, sauf peut-être dans certains cas très particuliers, mais il est possible d'utiliser l'atténuation assurée par les structures métalliques des bâtiments. Il est également possible d'utiliser les câbles blindés installés entre deux équipements pour des raisons de CEM pour assurer la protection contre les champs électromagnétiques créés par la foudre.

5.6.2.2 Environnement conduit

5.6.2.2.1 IEMN-HA initiale et intermédiaire

Un dispositif de protection contre les environnements de conduction primaires ou secondaires créés par la foudre (voir 5.6.1) est systématiquement installé aux points d'entrée des lignes électriques basse ou moyenne tension ou des lignes de télécommunication de nombreux bâtiments. Ces dispositifs équipent très souvent les lignes aériennes et se rencontrent fréquemment en milieu rural. Comme indiqué plus loin, ce type de dispositif de protection peut également assurer une certaine protection contre les effets initiaux et intermédiaires de l'IEMN-HA.

5.6.2.2.2 IEMN-HA finale

Les problèmes dus à l'IEMN-HA finale ne concernent que les lignes de grande longueur (1 km au minimum) dont les deux extrémités sont reliées à la terre (par exemple des lignes électriques venant de transformateurs avec enroulements reliés à la terre). Pour de longues lignes à basse tension (par exemple les lignes de télécommunication) qui ont un seul point mis à la terre, des pannes peuvent se produire si la tension induite par l'IEMN-HA finale (40 V/km d'après la CEI 61000-2-10), dépasse la tension disruptive des parasurtensions entre la ligne et la terre. Pour des lignes de transmission ou de distribution de l'énergie électrique, pour lesquelles les tensions de fonctionnement sont beaucoup plus élevées que pour les lignes de télécommunication, l'amorçage des dispositifs de protection est peu probable. Cependant, si la ligne est mise à la terre en deux points à travers des transformateurs ou par un autre équipement, un courant de court-circuit d'environ 16 A pourrait s'écouler à travers l'installation d'après la CEI 61000-2-10. Ces courants se traduisent principalement par des effets de saturation dans le noyau des transformateurs situés aux deux extrémités de la ligne. Cela signifie que les principes de protection contre les courants induits par l'IEMN-HA finale peuvent utiliser des transformateurs de répartition ayant au moins un enroulement connecté en triangle

5.6.1 HEMP and lightning sources

The sources of lightning effects are the first and subsequent return stroke currents. These currents may directly hit a line, an equipment, an installation or a building and, as such, represent the primary lightning conducted environment. If the lightning does not hit parts of the installation directly, then the lightning current produces an electromagnetic field which represents a radiated lightning environment. This field will induce voltages and currents in nearby circuits, producing a secondary lightning conducted environment.

The primary source of effects from HEMP is the radiated electromagnetic field which, by coupling to transmission lines or to different kinds of circuits, produces the voltages and currents representing the HEMP conducted environment.

5.6.2 HEMP and lightning protections

The protection concepts for HEMP and for lightning are not the same. Different approaches are used for radiated and conducted environments.

5.6.2.1 Radiated environment

As covered in clause 7, the attenuation capability of a shielded room should be suitable to protect the vital equipment against HEMP. Shielded enclosures are not normally used for protection against lightning radiated electromagnetic fields, except perhaps for very particular cases, but advantage is taken from the attenuation offered by the metallic structures of the buildings. Advantage is also taken from shielded cables between two sets of equipment installed for EMC purposes to provide protection against lightning electromagnetic fields.

5.6.2.2 Conducted environment

5.6.2.2.1 Early- and intermediate-time HEMP

Systematic protection against the lightning primary or secondary conducted environment (see 5.6.1) is installed on low- or medium-voltage power supply or telecommunication lines at entry points of many buildings. This protection is more common for aerial lines and also for rural environments. As discussed below, lightning protection employing SPDs (surge protection devices) can provide some protection against early – and intermediate – time HEMP effects.

5.6.2.2.2 Late-time HEMP

Problems due to late-time HEMP can arise only on long lines (at least 1 km), if both ends of the line are grounded (e.g. power distribution lines with grounded transformer windings). For long low voltage lines (such as a communication line) that happen to have a single-point ground, outages can take place if the voltage induced by the late-time HEMP (40 V/km, according to IEC 61000-2-10) exceeds the limiting voltage of the arrestors between the line and the ground. For power transmission or distribution lines, where the operating voltages are much larger than for communication lines, such arrestor damage is unlikely. However, if the power line is grounded at two points through transformers or other equipment, a short-circuit current of about 16 A could flow into connected equipment, according to IEC 61000-2-10. These currents will essentially give rise to saturation effects in the core of transformers connected at the two ends of the connection. Therefore, protection concepts against late-time

à chaque extrémité de la connexion. Dans ce cas, les enroulements ne sont pas mis à la terre et il n'existe aucune boucle fermée qui permette la circulation des courants continus. Ce cas fait l'objet de l'annexe B. Des informations plus détaillées et plus pratiques sur cette situation feront l'objet d'une future publication concernant l'atténuation d'influences externes.

5.6.3 Examen des deux types d'environnement

Des environnements typiques rayonnés et conduits dus à la foudre ont été sélectionnés pour comparaison avec les environnements IEMN-HA dans les conditions prévues par la CEI 61000-2-9 et la CEI 61000-2-10. Les critères de sélection du champ électromagnétique de la foudre sont les suivants:

- a) ne pas être trop près du coup de foudre car cette probabilité est faible mais ne pas en être trop loin car les effets indirects sont négligeables. Les distances retenues vont de 100 m à 1 km. Les critères de ce choix sont examinés à l'annexe A;
- b) les valeurs de crête du courant de foudre du premier arc en retour et des arcs en retour subséquents doivent correspondre au niveau de protection II, c'est-à-dire le niveau moyen défini dans la CEI 61312-1.

Il convient de souligner que ces valeurs de crête (150 kA pour le premier arc en retour et 37,5 kA pour les arcs en retour subséquents) sont supérieures aux valeurs de crête statistiques moyennes calculées à partir des mesures du courant de foudre naturel.

Les courbes utilisées pour effectuer ces comparaisons figurent à l'annexe A.

5.6.3.1 Environnement rayonné

La fréquence significative du champ électrique de l'IEMN-HA atteint au moins 100 MHz et le spectre de champ du premier arc en retour et des arcs en retour subséquents ne contient pas de valeurs significatives aux fréquences supérieures à 1 MHz pour le premier arc en retour et à 5 MHz pour les arcs en retour subséquents. Ce contenu fréquentiel différent n'est pas important pour la pénétration du champ à travers les parois d'une cage blindée, car la qualité des matériaux utilisés pour le blindage n'est pas très différente à 1 MHz ou à 100 MHz, mais des différences dans l'environnement interne peuvent apparaître à cause de résonances propres à la cage, ce qui donnerait lieu pour l'IEMN-HA à des interférences plus sévères que pour la foudre.

A basse fréquence, cependant, l'amplitude plus élevée du champ magnétique de la foudre peut avoir de l'importance car les propriétés protectrices contre les champs magnétiques basse fréquence de tous les matériaux sont médiocres, sauf celles de matériaux spéciaux comme le permalloy.

Le contenu énergétique des champs électriques (et magnétiques) de l'IEMN-HA et de la foudre n'est pas très différent. L'expression figurant dans la CEI 61000-2-9 pour calculer W_f montre que, pour le champ électrique de l'IEMN-HA, $W_f = 0,114 \text{ J/m}^2$.

Pour un coup de foudre à une distance de 600 m, (voir les critères définis à l'annexe A): pour le premier arc en retour, $W_f \approx 0,15 \text{ J/m}^2$ et pour l'arc en retour subséquent, $W_f \approx 0,04 \text{ J/m}^2$. Pour une distance de 100 m, les valeurs sont de 5 J/m^2 à 6 J/m^2 pour le premier arc en retour et de 1 J/m^2 à $1,5 \text{ J/m}^2$ pour l'arc en retour subséquent, cependant la probabilité de coups de foudre à des distances de 100 m ou de moins de 100 m du bâtiment est très faible.

Dans les cas où l'atténuation du champ externe par les parois d'un bâtiment est faible ou inexistante, l'environnement rayonné à l'intérieur de ce bâtiment dû aussi bien à l'IEMN-HA qu'à la foudre peut avoir une valeur élevée. Dans ces cas, l'utilisation de câbles blindés à tresse peut être efficace, en réduisant le couplage du champ à l'intérieur des câbles jusqu'à des fréquences de 20 MHz à 30 MHz.

HEMP induced currents can make use of distribution transformers with at least one delta winding at the two ends of the connection. In this case, the windings are not grounded and there is no closed path for the d.c. currents. This concept is illustrated in annex B. More detailed and practical arrangements for this situation will be given in a future document dedicated to installation and mitigation guidelines.

5.6.3 Discussion on the two types of environment

Typical lightning radiated and conducted environments have been chosen for comparison with the HEMP environments, as defined in IEC 61000-2-9 and IEC 61000-2-10. The criteria for this choice of lightning electromagnetic field are as follows:

- a) to be at a distance from the lightning stroke which is not too near to represent a low probability and not too far to have negligible indirect effects. Distances between 100 m and 1 km have been chosen. The criteria for this choice are discussed in annex A.
- b) to have lightning current peak values for the first and subsequent return strokes that correspond to protection level II which is the average level defined in IEC 61312-1.

It should be noted that these peak values (150 kA for the first stroke and 37,5 kA for the subsequent strokes) are higher than the statistical average peak values obtained from natural lightning current measurements.

The curves used to perform this comparison are provided in annex A.

5.6.3.1 Radiated environment

The significant frequency content of the HEMP electric field extends up to at least 100 MHz and the field spectrum for the first and subsequent lightning strokes does not have significant values for frequencies larger than 1 MHz for the first stroke and 5 MHz for the subsequent strokes. This different frequency content is not important with respect to the external field penetration through the shield because the quality of the materials used for shielding is not very different at 1 MHz or at 100 MHz, but differences in the internal environment can occur due to cavity resonances inside the room causing higher stresses than those due to lightning.

At low frequency, however, the higher amplitude of the lightning magnetic field can be important because the shielding properties for low frequency magnetic fields of all materials, except special ones like permalloy, are very poor.

The energy content of the HEMP and lightning electric (and magnetic) fields is not very different. Using the expression for W_f introduced in IEC 61000-2-9, one finds that, for the HEMP electric field, $W_f = 0,114 \text{ J/m}^2$.

For a lightning stroke at a distance of 600 m (see the criteria defined in annex A): for the first lightning return stroke, $W_f \approx 0,15 \text{ J/m}^2$ and for the subsequent stroke, $W_f \approx 0,04 \text{ J/m}^2$. At a distance of 100 m, the values for the first return stroke are 5 J/m^2 to 6 J/m^2 and for the subsequent stroke 1 J/m^2 to $1,5 \text{ J/m}^2$, however, the probability of lightning strokes at distances of 100 m or less from a building is very low.

For cases in which buildings have little or no electromagnetic shielding capability, the radiated environment inside the building from both HEMP and lightning can be important. In such cases, braided shields for cables can be effective, reducing the coupling inside the cables up to 20 MHz to 30 MHz.

5.6.3.2 Environnement conduit

5.6.3.2.1 IEMN-HA initiale

L'amplitude de l'environnement primaire conduit dû à la foudre (courants de foudre directs, dus au premier arc en retour ou aux arcs en retour subséquents) est une à deux fois plus grande que celle de l'environnement de l'IEMN-HA initiale pour un environnement d'une sécurité de 99 %. L'environnement secondaire (courants de foudre induits, le coup de foudre se produisant à 100 m de distance) est à peu près du même ordre de grandeur que l'environnement conduit dû à l'IEMN-HA initiale. Le rapport du/dt est supérieur d'environ un ordre de grandeur pour les courants IEMN-HA induits, que pour ceux induits par la foudre (voir également 8.4).

La comparaison des énergies dissipées dans les parasurtenseurs à gaz montrent que (voir annexe A):

- pour des courants de crête IEMN-HA de 4 kA, l'énergie est égale à $W_t = 0,7 \text{ mJ}$;
- pour un courant de foudre de 25 kA crête et ayant une forme d'onde de type 8/20 μs , l'énergie est égale à $W_t \approx 12 \text{ J}$.

5.6.3.2.2 IEMN-HA intermédiaire

L'environnement IEMN-HA intermédiaire conduit défini dans la CEI 61000-2-10 est un courant ayant une valeur crête maximale de 800 A, un temps de montée de 25 μs et une durée jusqu'à mi-hauteur de 1 500 μs . Cette onde est similaire à l'onde 10/700 μs (le niveau minimal d'essai est 100 A) obtenue à l'aide du générateur d'essai dans les conditions spécifiées par l'UIT et décrite dans la CEI 61000-4-5. Elle se situe également entre l'onde de courant normalisée utilisée pour les essais des éléments de protection 8/20 μs , 250 A à 2 kA et indiquée dans la CEI 61000-4-5, et la surtension d'essai de manoeuvre de 250/2 500 μs indiquée dans la CEI 60060-2. Les dispositifs de protection utilisés dans les différentes conditions auxquelles ces essais sont adaptés doivent donc également donner satisfaction dans ce cas.

Il convient cependant de souligner que les définitions du temps de montée de ces formes d'ondes sont différentes (voir CEI 61000-4-5). Pour la surtension d'essai 250/2 500 μs , le temps de montée est défini de zéro à la crête de la courbe de tension.

6 Sélection des composants

6.1 Sélection des composants du circuit

Les dispositions ci-dessous facilitent le choix de composants (non protecteurs) adaptés pour de nouveaux développements et/ou permettent d'évaluer la susceptibilité de circuits et matériels existants.

L'utilisation de systèmes de transmission mécaniques, hydrauliques ou par fibres optiques, en particulier à la périphérie d'un système, peut réduire le volume à protéger et éviter les problèmes d'interface.

Classement des effets induits par l'IEMN-HA:

- perturbation de courte durée n'entraînant pas de détérioration durable. Vérifier que le circuit se réarme automatiquement. Un verrouillage peut provoquer une destruction par la chaleur;
- détérioration ou destruction permanente de composants du circuit. Les composants à semi-conducteurs dont la tension d'amorçage est plus élevée supportent des perturbations plus importantes. Des amorçages en tension peuvent se produire aux entrées signaux des semi-conducteurs et également affecter la tension d'alimentation du circuit. Dans ce cas,

5.6.3.2 Conducted environment

5.6.3.2.1 Early-time HEMP

The amplitude of the primary lightning conducted environment (direct lightning currents, from first or subsequent return strokes) is one to two orders of magnitude higher than the early-time HEMP, for a 99 % severity environment. The secondary environment (induced lightning currents, for a lightning stroke at 100 m distance) is more or less of the same order of magnitude as the early-time HEMP conducted environment. The du/dt ratio is about one order of magnitude higher for HEMP-induced currents than for lightning (see also 8.4).

The comparison between energies dissipated in gas discharge tubes (see annex A) shows that:

- for HEMP peak currents of 4 kA, the energy is equal to $W_t = 0,7 \text{ mJ}$;
- for a lightning current of 25 kA peak value and having a 8/20 μs waveshape, the energy is equal to $W_t \approx 12 \text{ J}$.

5.6.3.2.2 Intermediate-time HEMP

The intermediate-time HEMP conducted environment as defined in IEC 61000-2-10 is a current with a maximum peak value of 800 A, a rise time of 25 μs and a time to half-value of 1 500 μs . Such a wave is similar to the 10/700 μs wave, (minimum test level 100 A) given by the test generator according to ITU and described in IEC 61000-4-5. It is also situated between the standard current wave for protection element tests 8/20 μs , 250 A to 2 kA given in IEC 61000-4-5 and the IEC 60060-2 switching test surge of 250/2 500 μs . This means that the different protection elements used in the various cases for which these specific tests are foreseen shall also cover this situation.

It should be noted, however, that definitions of rise time for these waveforms are different (see IEC 61000-4-5). For the test surge 250/2 500 μs , the rise time is defined from zero to the peak of the voltage curve.

6 Component selection

6.1 Selection of circuit components

This clause helps choose the right (non-protective) circuit components for new developments and/or judge the susceptibility of existing circuits and equipment.

The use of fibre optic, hydraulic or mechanical transmissions, especially at the circumference of the system, may reduce the volume to be protected and may prevent interface problems.

Classification of HEMP-induced effects:

- short-time interference with no lasting damage. Be sure that the systems resets itself automatically. Thermal destruction as a secondary effect of a latch-up is possible;
- permanent degradation or destruction of circuit components. Semiconductor components with higher breakthrough voltages withstand higher disturbance levels. Voltage breakthroughs may occur on signal inputs of semiconductors and also over the supply voltage of the circuit. In the latter case, any semiconductor within the equipment may be destroyed.

n'importe quel semi-conducteur du matériel peut être détruit. On doit choisir les tensions d'amorçage de façon à pouvoir augmenter provisoirement la tension d'alimentation du circuit d'au moins 30 % sans risquer d'endommager les composants. Il convient de fixer les tensions d'alimentation par des diodes Zener ou par des supresseurs de tensions transitoires à jonction-avalanche. Les destructions dues aux amorçages de tension peuvent être évitées si la valeur du courant de suite ne dépasse pas une limite relativement basse.

6.2 Sélection des dispositifs de protection contre les perturbations rayonnées

L'efficacité de blindage des enveloppes blindées est altérée par les pénétrations, les ouvertures et les joints. Les matériaux et les dispositifs de protection utilisés pour construire les cages de Faraday, les armoires et les bâtiments blindés sont décrits dans la CEI 61000-5-4 qui donne également leurs principes de fonctionnement, leurs limites et la liste des spécifications utiles.

6.3 Sélection des dispositifs de protection contre les perturbations conduites

6.3.1 Généralités

Les informations données dans ce paragraphe doivent faciliter la sélection de dispositifs de protection optimaux pour des applications spécifiques. Pour toutes informations complémentaires sur les spécifications et les méthodes d'essai concernant ces dispositifs, consulter la CEI 61000-5-5 et la CEI 61000-4-24. Bien qu'aucune des dispositions du présent rapport technique n'indique que seuls les dispositifs cités dans les normes CEI doivent être utilisés pour se protéger contre l'IEMN-HA, l'utilisation des spécifications de la CEI peut faciliter sensiblement la sélection des dispositifs de protection.

6.3.2 Catégories de dispositifs

6.3.2.1 Généralités

Ce paragraphe décrit les catégories d'éléments protecteurs les plus importants de la manière suivante: description fonctionnelle, caractéristiques spéciales, problèmes d'utilisation éventuels et applications types. Pour toutes informations complémentaires, se reporter aux annexes A, C et E de la CEI 61000-5-5.

6.3.2.2 Eclateurs à gaz

Les éclateurs à gaz contiennent généralement deux ou trois électrodes séparées par un ou plusieurs espaces et sont fermés hermétiquement, ce qui permet de contrôler le mélange de gaz et sa pression. Tant que la tension entre deux électrodes est inférieure à la tension d'amorçage, la valeur de la résistance d'isolement de l'espace est comprise entre quelques 100 MΩ et plus de 1 GΩ. A la tension d'amorçage, les électrons libres accélérés par le champ électrique ionisent une partie des atomes de gaz qui, à leur tour, cèdent de nouveaux porteurs de charge au canal de courant. Un effet d'avalanche fait généralement chuter la résistance d'isolement de l'espace au-dessous d'1 mΩ en moins d'une nanoseconde. La tension d'amorçage de 1 kV/ns d'un éclateur à gaz de 230 V est généralement 8 à 15 fois supérieure à celle correspondant à la tension continue. Après un temps de recouvrement compris entre la micro et la milliseconde (ce qui dépend des caractéristiques courant-temps de la surtension), la résistance d'isolement revient à son état antérieur.

Les éclateurs à gaz se caractérisent principalement par une résistance d'isolement élevée et une faible capacité de charge à l'état non conducteur, et par une capacité de charge élevée par rapport à leur taille et à leur prix, à l'état conducteur.

Des problèmes peuvent apparaître si la tension permanente de fonctionnement du circuit est supérieure à la tension de maintien de l'éclateur à gaz. Dans ce cas, l'éclateur peut ne pas revenir à son état antérieur et conserver une impédance faible après le passage de la surtension, ce qui peut détériorer irrémédiablement le parasurtenseur.

Breakthrough voltages shall be chosen such that the supply voltage of the circuit may temporarily be increased by at least 30 % without endangering the components. Supply voltages should be clamped by zener diodes or avalanche-junction transient voltage suppressors. Destruction because of a voltage breakthrough may be avoided if the follow-on current can be limited to a sufficiently low value.

6.2 Selection of protective devices against radiated disturbance

The shielding effectiveness of shielded enclosures is violated by penetrations, openings and seams. The material and protective devices used for the construction of Faraday cages, cabinets and shielded buildings are described in IEC 61000-5-4, which gives their principles of operation, their limitations and a listing of the necessary specifications.

6.3 Selection of protective devices against conducted disturbance

6.3.1 General

The information given in this subclause shall help in the selection of optimal protective devices for specific applications. For additional information on device specification and test methods, reference is made to IEC 61000-5-5 and IEC 61000-4-24. Although the present technical report does not suggest that only IEC-specified devices shall be used for HEMP protection, the use of IEC specifications may significantly facilitate the selection of devices.

6.3.2 Device categories

6.3.2.1 General

In this subclause, the most important protective element categories are described, using the following format: functional description, special features, possible application-related problems and typical applications. For additional information see annexes A, C and E of IEC 61000-5-5.

6.3.2.2 Gas discharge tubes

Gas discharge tubes usually contain two or three electrodes separated by one or several gaps. They are hermetically sealed so that the gas mixture and pressure are under control. As long as the voltage across a gap is smaller than its sparkover voltage, the gap insulating resistance is in the range of several 100 M Ω to more than 1 G Ω . At sparkover voltage, the free electrons, accelerated by the electric field, ionize some of the gas atoms which, in turn, contribute more charge carriers to the current path. An avalanche effect breaks down the insulating resistance of the gap to less than 1 m Ω , usually within less than 1 ns. The sparkover voltage of a 230 V gas discharge tube at 1 kV/ns is typically about 8 to 15 times higher than for d.c. voltage. After a recovery time in the micro- to millisecond range (depending on the current-time characteristic of the surge event), the insulation resistance returns to its initial state.

The main features of gas discharge tubes are a high insulating resistance and a low capacity, in the non-conducting state, and a high current-carrying capability compared to their size and cost, in the conducting state.

Problems may arise if the continuous operating voltage of the circuit is higher than the hold-over voltage of the gas discharge tube. In this case, the gas discharge tube may not return to its original state, but may remain in its low impedance state after the passage of the surge. This may result in the destruction of the arrester.

En règle générale, les éclateurs à gaz sont utilisés comme éléments de protection primaire des lignes téléphoniques d'abonnés, dans les circuits de protection et les parasurtenseurs de sécurité. Ils sont le seul élément protecteur des circuits coaxiaux r.f. pour lesquels leur faible capacité et leurs caractéristiques linéaires à l'état non conducteur constituent un avantage essentiel. Du fait des problèmes de maintien, ils ne sont pas adaptés à une utilisation sur les lignes à courant alternatif, sauf si l'instruction est assurée par une résistance série ou une varistance série (comme dans les parasurtenseurs à résistance non linéaire et dans les parasurtenseurs de sécurité).

6.3.2.3 Varistances à oxyde métallique (MOV)

Les varistances à oxyde métallique sont des éléments non linéaires faits d'un mélange d'oxyde de zinc et d'autres oxydes métalliques par frittage. Les particules frittées forment un agrégat de micro-varistances connectées en parallèle et en série par rapport au chemin principal suivi par le courant. La longueur (ou l'épaisseur) de la varistance détermine donc la tension de la varistance et sa largeur (ou diamètre) sa capacité de charge. Son volume est à peu près proportionnel à sa capacité d'absorption d'énergie pour l'application considérée. La caractéristique U/I d'une varistance peut être exprimée par l'expression

$$I = k \times U^a$$

où k est une constante qui dépend de la géométrie de la varistance et a est un exposant de non-linéarité (valeur type: 35-50).

Les varistances à oxyde métallique (MOV) se caractérisent principalement par une capacité de charge élevée associée à une bonne limitation de la tension pour un coût relativement faible. Comme elles n'ont pas de caractéristiques de claquage, elles constituent un élément de protection primaire et secondaire bien adapté sur les lignes d'alimentation en courant alternatif.

Comme le point à 1 mA des varistances à oxyde métallique tend à baisser quand elles ont absorbé de l'énergie antérieurement, leur tension varistance (tension à 1 mA) doit être choisie très soigneusement en tenant compte de la tension maximale de service (voir aussi 6.3.3.5).

6.3.2.4 Parafoudres à résistance variable

Selon la définition 2.2 de la CEI 60099-1, les parafoudres à résistance variable sont constitués d'éclateurs et de résistances non linéaires montés en série. Les éclateurs assurent une résistance d'isolement élevée à l'état bloqué et les résistances non linéaires limitent le courant de suite et la baisse de la tension d'alimentation. Les parafoudres à résistance variable se rencontrent surtout sur les circuits d'alimentation en courant alternatif à 120 V ou plus. Après une onde de courant, le parafoudre revient à son état antérieur quand la tension d'alimentation passe par zéro.

6.3.2.5 Ecrêteurs de transitoires à jonctions avalanches (diodes de protections)

Ces écrêteurs sont des diodes à semi-conducteurs qui suppriment les tensions transitoires soit dans le même sens que leur caractéristique tension-courant, soit dans le sens inverse. Elles se caractérisent par un exposant a de non-linéarité élevée, proche de 100 (voir également 6.3.2.3). Contrairement aux varistances à oxyde métallique, la caractéristique tension-courant n'est pas modifiée par une absorption antérieure d'énergie (elle peut par contre être modifiée par la température).

Ces supprimeurs sont très souvent installés sur les circuits d'entrée et de sortie des lignes de faible longueur et servent aussi à protéger les tensions d'alimentation en courant continu de 6 V à 250 V. Des versions à faible capacité (C = environ 50 pF) peuvent être utilisées pour les circuits r.f.

Gas discharge tubes are typically used as primary protection elements on telephone subscriber lines, in protection circuits, in safety arresters and as sole protection elements in r.f. coaxial circuits, where their low capacity and linear characteristic in the non-conducting state are particularly advantageous. Because of hold-over problems, they are not suited for use on a.c. power lines, unless clearing action is assured by a series resistance or a series varistor (as used in non-linear resistor type arresters and safety arresters).

6.3.2.3 Metal oxide varistors (MOV)

Metal oxide varistors are non-linear elements made of a sintered mixture of zinc oxide and other metal oxides. With respect to the main current path, the sintered particles form an aggregate of series- and parallel-connected micro-varistors. Thus the length (or the thickness) of the varistor body accounts for the varistor voltage and the width (diameter) for the current carrying-capability. Its volume is roughly proportional to the energy absorbance capability required for the envisaged application. The U/I characteristic of a varistor can be described by:

$$I = k \times U^a$$

where k is a constant, depending on the geometry of the varistor and a is a non-linearity exponent (typical value: 35-50).

The main feature of metal oxide varistors is the combination of a high current-carrying capability and a good voltage-limiting action at a relatively low cost. As they have no breakdown characteristic, they are especially suited for use as primary and secondary protection elements on a.c. power lines.

As metal oxide varistors tend to lower their 1 mA point as a consequence of their energy absorption history, their varistor voltage (voltage at 1 mA) shall be chosen very carefully with respect to the maximum operating voltage (see also 6.3.3.5).

6.3.2.4 Non-linear resistor type arresters

According to definition 2.2. of IEC 60099-1, non-linear resistor type arresters are combinations of multiple spark gaps and non-linear resistors in series connection. The spark gaps provide a high insulation resistance in the off-state and the non-linear resistors limit the follow-on current out of the power supply voltage. Non-linear resistor type arresters are mainly used on a.c. power circuits for 120 V or higher. After the passage of a surge current, the arrester returns to its original state when the supply voltage passes through zero.

6.3.2.5 Avalanche-junction transient voltage suppressors (protective diodes)

These suppressors are semiconductor diodes that suppress transient voltages in either the forward or reverse direction of their voltage-current characteristic. Their main feature is a high non-linearity exponent a , close to 100 (see also 6.3.2.3). They differ from metal oxide varistors in that their voltage-current characteristic does not change as a consequence of energy absorption history (although there is a dependence on temperature).

Typical applications are in input and output circuits for short lines and for protection of d.c. power supply voltages in the range between 6 V and 250 V. Low capacitance versions ($C =$ approximately 50 pF) may be used in r.f. circuits.

6.3.2.6 Filtres

Même si l'on peut considérer que la plupart des filtres ne constituent pas une protection complète contre les perturbations dues à l'IEMN-HA, ils sont souvent utilisés à cet effet mais ils sont alors associés à des dispositifs limiteurs de tension et à avalanche. Dans ce cas, ils intègrent et donc atténuent les impulsions de tension résiduelle qui traversent les éléments de protection primaire. De plus, ils peuvent permettre de découpler l'élément de protection primaire de l'élément secondaire. Ils empêchent également les courants transportés par les lignes entrantes de pénétrer dans le volume blindé.

Comme les tensions dues à l'IEMN-HA sont principalement des signaux en mode commun, il convient que les filtres de protection aient une atténuation de mode commun adéquate sur une large plage du spectre IEMN-HA. La plupart des filtres de protection contre l'IEMN-HA sont de type passe-bas, mais n'importe quel autre type de filtre (passe-haut et passe-bande) peut être utilisé; cela dépend de la bande de fréquences utile dans les conditions normales de fonctionnement. Le filtre agit en rejetant toutes les parties du spectre qui ne sont pas nécessaires dans les conditions de fonctionnement normales. Dans la plupart des circuits à deux fils (lignes de télécommunication et lignes basse tension en courant alternatif), pratiquement aucune atténuation des signaux de fonctionnement en mode différentiel (mode fil à fil) n'est permise. Cette contradiction apparente est résolue par l'utilisation d'inductances de filtrage à compensation de courant avec deux enroulements identiques sur un noyau. L'inductance de mode commun peut être mille fois plus élevée que celle de mode différentiel. Il faut s'assurer que les courants de service dans les deux enroulements de l'inductance sont absolument identiques (pas de retours communs à la terre.) Le déséquilibre des courants entraîne une compensation insuffisante du flux magnétique et la saturation du noyau.

L'entrée non protégée d'un circuit filtre peut être équipée d'un élément capacitif (parallèle) ou d'un élément inductif (série). Une entrée capacitive est déconseillée en cas d'utilisation d'un éclateur à gaz car elle retarde l'établissement de la tension sur l'élément de protection primaire, ce qui retarde donc son allumage. Quand l'amorçage est réalisé, le courant de crête n'est limité que par l'inductance potentiellement très faible du condensateur, de l'éclateur à gaz et du câblage d'interconnexion. Les valeurs crêtes peuvent être jusqu'à cent fois supérieures à celles de filtres à entrées inductives, où la première crête du courant de décharge est limitée par l'impédance caractéristique de la ligne.

Des problèmes particuliers peuvent apparaître entre les filtres des lignes d'alimentation en courant alternatif et les systèmes de transmission de signaux sur le réseau. Si la fréquence de coupure passe-bas du filtre est du même ordre que les signaux du réseau, la résonance série de l'impédance de l'entrée non protégée peut mettre les signaux du réseau en court-circuit et perturber le fonctionnement normal du système. Le paragraphe 4.7.4. (impédance d'entrée) de la CEI 61000-5-5 indique la plage critique de l'impédance d'entrée où des problèmes peuvent se produire. Ces problèmes peuvent être évités par l'utilisation de filtres de mode commun permettant une faible atténuation en mode différentiel ou par l'utilisation de filtres ayant une fréquence de coupure passe-bas plus élevée.

Sur les lignes d'alimentation en courant alternatif, les filtres devant fournir une atténuation et une valeur nominale de courant élevées (par exemple 100 dB pour $f \geq 14$ kHz) ont une impédance très basse et par conséquent une capacité à la terre élevée (supérieure, par exemple, à 100 μ F). La valeur du courant de fuite à la terre peut atteindre ou dépasser 7 A. La mise à la terre de ces filtres doit être soigneusement faite. Il convient d'installer des plaques portant la mention «débrancher les fils de phase avant de débrancher la terre» ou un avertissement équivalent, partout où la connexion à la terre peut être démontée.

Les filtres des lignes d'alimentation en courant alternatif sont généralement calculées pour un courant efficace maximal. Des difficultés peuvent apparaître si la charge du filtre atteint cette limite et si le courant est très nettement non sinusoïdal. Les problèmes suivants peuvent se poser: saturation partielle aux crêtes de courant, influence sur la forme d'onde de la tension, perturbation mutuelle de deux équipements, d'une phase sur l'autre ainsi que d'autres problèmes. Ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'un filtre à courant assigné plus élevé ou par la compensation d'une charge nettement inductive du côté protégé du filtre.

6.3.2.6 Filters

Although most filters may not be regarded as a complete protection against HEMP-induced disturbance, they are often used in HEMP protection together with voltage-breakdown and voltage-limiting devices. In this combination, they integrate and thus attenuate the residual voltage pulses passing by the primary protection elements. Additionally, they may be used to provide decoupling between the primary and secondary protection elements. They also prevent currents in penetrating wires from entering inside the shielded volume.

As HEMP-induced voltages are basically common mode signals, protective filters should have an adequate common mode attenuation over a wide range of the HEMP spectrum. Most filters used for HEMP protection are low-pass filters, but any other filter type (high- and band-pass) may be used, depending on the frequency band for normal operation. The protective action of the filter is established by rejecting all parts of the spectrum that are not needed for normal operation. In most two-wire systems, such as a.c. low voltage power lines and telecommunication lines, almost no attenuation to operating signals in the balanced mode (wire to wire mode) is allowed. This apparent contradiction is overcome by the use of current compensated filter inductances with two identical windings on one core. Their inductance may be up to a thousand times higher for common mode signals than for signals in the balanced mode. Care must be taken to assure that the operating currents in both windings of the inductance are exactly the same (no common ground returns). Unbalanced currents result in insufficient compensation of the magnetic flux and saturation of the core.

A filter circuit may have a capacitive (parallel) element or an inductive (series) element at the unprotected input. If a gas discharge tube is used for surge protection, a capacitive input is in general unfavourable because it retards the build-up of the voltage on the primary protection element and thus retards its firing. Once it fires, the peak current is only limited by the potentially very small inductance of the capacitor, gas discharge tube and interconnecting wiring. Peak values may be up to a hundred times higher than in inductive filter inputs, where the first peak of the discharge current is limited by the characteristic impedance of the line.

Special problems may arise between a.c. power line filters and mains signalling systems. If the low pass cut-off frequency of the filter is in the same range as the mains signals, the series resonance of the unprotected input impedance may short-circuit the mains signals and thus disturb the system in normal operation. IEC 61000-5-5, subclause 4.7.4 (input impedance), gives the critical range of the input impedance in which problems may occur. Such problems may be avoided by using common mode filters with a low balanced mode attenuation or filters with a higher low-pass cut-off frequency.

AC power line filters for high nominal current and high attenuation (e.g. 100 dB at $f \geq 14$ kHz) have a very low impedance and therefore a high capacity to ground (e.g. more than 100 μ F). AC leakage current to ground may be 7 A or higher. These filters shall be grounded very carefully. Warning plates should be installed in every place where the ground connection could possibly be disconnected, saying "disconnect phase conductors before disconnecting ground" or similar.

AC power line filters are usually rated for a maximum r.m.s. current. Problems may arise if the filter is loaded to this limit and the current is significantly non-sinusoidal. Possible problems include: partial saturation for current peaks, influence on voltage wave shape, cross disturbance from one equipment to another, from one phase to another, and others. These problems may be overcome by using a filter with a higher rated current or by compensating a largely inductive load on the protected side of the filter.

6.3.2.7 Circuits de protection

Les circuits de protection combinent des éléments de protection primaire et secondaire et contiennent au moins un élément série permettant de découpler des éléments à avalanche et/ou limiteurs de tension. Comme ces circuits sont généralement équipés d'un filtre, les dispositions de 6.3.2.6 leur sont également applicables.

La figure 4 représente le schéma d'un circuit de protection type. L'élément série Z_L doit remplir plusieurs fonctions très importantes. Il limite le courant de décharge dans l'élément de protection secondaire et, si l'élément de protection primaire est un parasurtenseur à gaz, il permet l'élévation de la tension d'entrée jusqu'au point d'amorçage. Son impédance doit être suffisamment élevée pour que l'élément de protection secondaire ne soit pas détruit, même en cas de surtensions prolongées n'atteignant pas la tension d'amorçage statique du parasurtenseur à gaz. En cas de surtensions de courte durée, comme c'est le cas pour l'IEMN-HA initiale, une inductance de 10 μH à 100 μH peut être suffisante pour découpler en toute sécurité les deux éléments de protection, mais pour des surtensions plus longues, Z_L doit avoir une composante ohmique. Les valeurs types sont comprises entre 5 Ω et 22 Ω . Des circuits de protection bien conçus et universels doivent pouvoir être découplés sans risque pendant 10 ms.

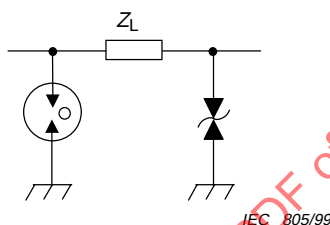


Figure 4 – Circuit de protection type

Le paragraphe 4.8.2 de la CEI 61000-5-5 définit le cas de tension résiduelle le plus défavorable devant être pris en compte pour définir les spécifications relatives à un circuit de protection. Cette définition permet d'être sûr que la tension résiduelle n'excède pas la valeur spécifiée, quelle que soit la surtension et qu'elle soit due à la foudre ou à l'IEMN-HA. La même norme stipule également qu'aucun élément de protection secondaire ne doit être détruit par l'IEMN-HA ou par la foudre, sauf en cas de destruction simultanée de l'élément de protection primaire correspondant. Il est important de vérifier que les spécifications des circuits de protection utilisés ont été établies à partir de ces définitions.

6.3.2.8 Parafoudres de sécurité

Les parafoudres de sécurité combinent des éclateurs à gaz ou des éclateurs à air avec des varistances. Leur fonction primordiale est de protéger les matériels mobiles (par exemple des réfrigérateurs mobiles dans des marchés ouverts) raccordés à des lignes d'alimentation en courant alternatif jusqu'à une tension assignée de 400 V.

Dans ce contexte, le mot «sécurité» signifie un danger potentiel pour l'opérateur. Ce danger peut être créé par des défaillances accidentelles des dispositifs de protection connectés à la tension d'alimentation. On suppose que, dans le cas de matériels mobiles équipés de câbles et de prises plus vulnérables, il existe une probabilité plus élevée que ce type de défaillance soit dangereux pour l'opérateur. La conception de la sécurité sur laquelle reposent les parafoudres de sécurité est examinée de façon approfondie dans l'annexe C de la CEI 61000-5-5. Cette annexe est donnée à titre d'information et il convient que l'utilisateur s'assure avec soin que les exigences imposées sont conformes à l'utilisation qu'il envisage ainsi qu'aux normes nationales et internationales applicables.

6.3.2.7 Protection circuits

Protection circuits are combinations of primary and secondary protective elements, containing at least one longitudinal element for decoupling various voltage-breakdown and/or voltage-limiting elements. As these circuits usually contain some kind of filter, the terms of 6.3.2.6 also apply here.

Figure 4 shows the diagram of a typical protection circuit. The series element Z_L shall fulfil several important functions. It limits the discharge current through the secondary protection element and, if a gas-filled surge protector is used as a primary protection element, it permits the rise of the input voltage up to the sparkover point. Its impedance shall be sufficiently high that the secondary protection element is not destroyed, even with long-lasting surges which do not reach the static sparkover voltage of the gas-filled surge protector. For short surges as in early-time HEMP, an inductance of 10 μH to 100 μH may be sufficient to safely decouple the two protection elements, but for longer lasting surges, Z_L shall have a resistive component. Typical values are in the range of 5 Ω to 22 Ω . Well-designed and universally applicable protection circuits shall be capable of being safely decoupled for as much as 10 ms.

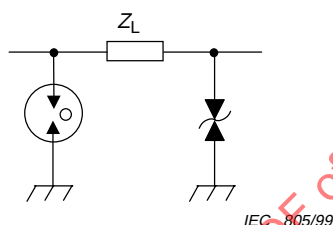


Figure 4 – Typical protection circuit

IEC 61000-5-5, subclause 4.8.2 defines a worst case residual voltage for the specification of protection circuits. This definition ensures that the residual voltage does not exceed the specified value under any possible surge initiated by HEMP or lightning. The same standard also prescribes that no secondary protection element shall be destroyed by HEMP or lightning, unless the corresponding primary protection element is destroyed at the same time. It is important to verify that the protection circuits used are specified according to these definitions.

6.3.2.8 Safety arresters

Safety arresters are combinations of gas discharge tubes or spark gaps and varistors. They are primarily assigned to be used for protection of mobile equipment (e.g. mobile refrigerators installed in open markets) connected to a.c. power supply lines up to 400 V rated voltage.

The word 'safety' in this context refers to a potential danger for the operator, caused by accidental malfunctions of protection devices connected to the power supply voltage. It is assumed that, in mobile equipment with their more vulnerable cables and mains plugs, the probability is higher that such malfunctions can lead to a danger for the operator. The safety philosophy of safety arresters is discussed in more detail in IEC 61000-5-5, annex C.

As annex C of that standard has an informative status, the user should carefully verify whether the requirements given comply with his application, and with national and other international standards that could also apply.

6.3.2.9 Protections coaxiales pour circuits r.f.

Ce paragraphe traite de deux sous-catégories de dispositifs de protection coaxiale des circuits r.f.: les tronçons de ligne ou résonateurs (filtres) et les supports coaxiaux pour dispositifs à avalanche et à limitation de tension. Comme l'installation de dispositifs de protection peut avoir une influence considérable sur les caractéristiques de fonctionnement normales des circuits r.f., les dispositifs de protection coaxiale des circuits r.f. doivent être compatibles avec des paramètres r.f. tels que les pertes d'insertion, le coefficient de réflexion, l'affaiblissement d'adaptation ou le taux d'ondes stationnaires, propres au circuit, au matériel ou au système sur lequel ils seront montés. Le montage de nouveaux composants (dispositifs de protection) sur un système r.f. peut faire tomber les performances générales au-dessous des valeurs garanties par le constructeur. En cas d'essai de réception sur le site, il peut donc être nécessaire de réexaminer les performances générales du système avec le constructeur ou le fournisseur.

Les tronçons de ligne, les résonateurs et les filtres protègent en limitant la bande passante du spectre IEMN-HA. Comme l'IEMN-HA et la foudre sont des phénomènes à large bande, il convient de prendre en compte une plage étendue de fréquences allant du courant continu à la cinquième harmonique de la fréquence la plus haute du signal. D'autres éléments du système (dipôles repliés, transformateurs à ferrite) peuvent participer à la protection en permettant des mises en court-circuit en continu et à basse fréquence qui réduisent un peu plus l'énergie de la surtension. En fait, les tronçons de ligne quart d'onde donnent la réponse en fréquence d'un circuit oscillant parallèle. Cependant, contrairement aux circuits oscillants L-C classiques, cette caractéristique se répète aux harmoniques impaires. Il convient également de considérer que les paramètres r.f. (pertes d'insertion, coefficient de réflexion etc.) sont des paramètres à ondes entretenues et qu'ils ne décrivent pas suffisamment la réponse d'un dispositif à une fonction échelon. Cela peut être illustré par l'exemple d'un tronçon de ligne quart d'onde dans lequel un échelon de tension n'est sensiblement amorti que si l'onde incidente a été réfléchie au niveau du court-circuit et est renvoyée au point de dérivation.

Des problèmes particuliers peuvent se produire en cas d'utilisation de semi-conducteurs tels que des diodes protectrices et des varistances comme dispositifs de protection contre les surtensions. Ces éléments peuvent provoquer des distorsions et des intermodulations au cours du fonctionnement normal, en particulier en présence de grands signaux provenant d'appareils transmetteurs proches. Il convient donc que ces éléments ne soient jamais utilisés dans les systèmes récepteurs sensibles à large plage de réglage, par exemple les récepteurs de surveillance. Les éclateurs à gaz ne créent pas de problèmes de ce genre tant que la tension crête de fonctionnement reste inférieure à la tension d'amorçage statique.

6.3.3 Protection d'interfaces de ligne types

6.3.3.1 Lignes de transmission à deux fils de données vocales et de données basse fréquence

Les dispositifs de protection adaptés aux lignes téléphoniques d'abonnés et autres lignes à deux fils techniquement semblables, en général pour des fréquences allant du continu ou de 300 Hz jusqu'à 3 400 Hz (transmission de la parole et de données jusqu'à 4 800 bit/s), ou du continu ou de 300 Hz jusqu'à 15 kHz (signaux de modulation et transmission de données jusqu'à 9 600 bit/s) sont: les éclateurs à gaz (voir 6.3.2.2), les combinaisons d'éclateurs à gaz et de filtres à une ou deux voies (voir 6.3.2.6) et les circuits de protection à une ou deux voies (voir 6.3.2.7). Il convient que les dispositifs de protection installés sur les lignes de grande longueur et en face d'entrées et de sorties isolées n'abaissent pas la tension statique à la terre au-dessous de 200 V (voir la CEI 61000-5-5, annexe A, circuits de protection type a et c).

Deux critères doivent être pris en compte dans le choix de dispositifs de protection.

6.3.2.9 Coaxial r.f. circuit protectors

In this subclause, reference is made to two sub-categories of coaxial r.f.-circuit protectors: stublines or resonators (filters) and coaxial holders for voltage-breakdown and voltage-limiting devices. As the insertion of protective devices may considerably influence the normal operating properties of r.f. circuits, coaxial r.f. circuit protectors shall comply with r.f. parameters such as insertion loss, reflection coefficient, return loss or standing wave ratio that are required by the circuit, equipment or system into which they will be inserted. By adding new components (protective devices) to an r.f. system, the overall performance may decrease below the values guaranteed by the manufacturer. For *in situ* acceptance tests, it might, therefore, be necessary to reconsider the overall performance data of the system together with the manufacturer or supplier.

Stublines, resonators and filters provide protection by limiting the bandwidth of the HEMP spectrum. As HEMP and lightning are broad band phenomena, a wide frequency spectrum from d.c. up to the fifth harmonic of the highest signal frequency should be considered. Other elements of the system, such as folded dipole antennas and ferrite transformers, may assist protection by providing additional d.c. and low frequency short circuits that further reduce surge energy. Quarter wavelength stublines basically provide the frequency response of a parallel resonant circuit. However, unlike with conventional L-C resonant circuits, this characteristic is repeated at the uneven harmonics. It should also be noted that r.f. parameters such as insertion loss, reflection coefficient, etc. are continuous wave parameters and that they do not sufficiently describe the response of a device to a step function. This may be illustrated by the example of a quarter wavelength stubline, where a voltage step is not considerably damped unless the incident wave has been reflected at the short circuit and propagated back to the branching point.

Special problems may arise if semiconductors such as protective diodes and varistors are used for surge protection. The use of such elements may result in distortion and cross-modulation during normal operation, especially if large signals from nearby transmitters are present. These elements should therefore never be used in sensitive receiver systems with a wide tuning range (e.g. surveillance receivers). Gas discharge tubes do not create these problems as long as the peak operating voltage is safely below the static sparkover voltage.

6.3.3 Protection of typical line interfaces

6.3.3.1 Two-wire speech and low-frequency data transmission lines

The suitable protective devices for telephone subscriber lines and other technically similar two-wire lines, typically for frequencies from d.c. or 300 Hz to 3 400 Hz (speech and data transmission up to 4 800 bit/s), or from d.c. or 300 Hz to 15 kHz (modulation signals and data transmission up to 9 600 bit/s) are: gas discharge tubes (see 6.3.2.2), combinations of gas discharge tubes and one- or two-path filters (see 6.3.2.6), and one- or two-path protection circuits (see 6.3.2.7). Protective devices on long lines and in front of insulated inputs and outputs should have no static voltage limiting action to ground lower than 200 V (see IEC 61000-5-5, annex A, protection circuits type a and type c).

Two criteria shall be considered when choosing protection devices.

6.3.3.1.1 Critères relatifs aux surtensions

- Courant de décharge impulsionnel: ce courant dépend des paramètres de la surtension prévue (foudre et IEMN-HA);
- Tension résiduelle: cette tension dépend du type de protection mis en œuvre (voir 7.3).

6.3.3.1.2 Caractéristiques de transmission

Il convient que les dispositifs de protection altèrent le moins possible les performances normales en service d'un circuit ou d'un matériel. Il est donc nécessaire de discuter les spécifications de transmission des dispositifs de protection avec le propriétaire ou l'opérateur de la ligne (compagnie téléphonique) et avec le constructeur du matériel à protéger. L'annexe C propose des valeurs limites pouvant servir de base à ces discussions. Des valeurs inférieures peuvent être acceptées d'un commun accord par les parties.

6.3.3.2 Lignes de transmission à deux fils de données haute fréquence et de données vocales

Les dispositifs de protection adaptés aux lignes téléphoniques d'abonnés et autres lignes à deux fils techniquement semblables pour des fréquences allant de 0 MHz à 8 MHz (transmission de données HF, de musique et de la parole jusqu'à 2 048 kbit/s, distribution câblée) sont: les éclateurs à gaz (voir 6.3.2.2), les combinaisons d'éclateurs à gaz et de filtres à deux voies (voir 6.3.2.6) et les circuits de protection à deux voies (voir 6.3.2.7). Il convient que les dispositifs de protection installés sur les lignes de grande longueur et en face d'entrées ou de sorties n'abaissent pas la tension statique à la terre au-dessous de 200 V (voir la CEI 61000-5-5, annexe A, circuits de protection type a et c). Les deux critères ci-dessus (spécifications relatives aux surtensions et caractéristiques de transmission) doivent être pris en compte conformément aux indications de 6.3.3.1.

6.3.3.3 Autres circuits d'acheminement de signaux basse puissance

Les autres circuits d'acheminement de signaux basse puissance peuvent être traités comme indiqué en 6.3.3.1 et en 6.3.3.2. Les lignes courtes qui ne sortent pas du circuit de terre local peuvent être équipées de limiteurs de tension dont la tension limite est inférieure à 200 V (varistances et écrêteurs de transitoires à jonctions avalanches) et qui doivent être placés entre le circuit et la terre locale s'ils sont installés en face d'entrées ou de sorties.

6.3.3.4 Lignes coaxiales haute fréquence

Voir 6.3.2.9.

6.3.3.5 Lignes d'alimentation basse tension

Les dispositifs de protection adaptés sont les varistances à oxyde métallique (voir 6.3.2.3), les parafoudres à résistance variable (voir 6.3.2.4), les combinaisons parafoudres et filtres (voir 6.3.2.6), les circuits de protection (voir 6.3.2.7) et les parasurtenseurs de sécurité (voir 6.3.2.8) destinés aux matériels mobiles.

Les critères relatifs aux surtensions sont les suivants.

- Courant de décharge impulsionnel, déterminé en fonction des paramètres de la surtension prévue (foudre et IEMN-HA).
- Tension résiduelle. La tension résiduelle la plus élevée dépend principalement de la tension varistance qui a été choisie et du courant de crête prévu. La tension (nominale) la plus basse de la varistance doit être au moins 2,5 fois supérieure à la tension de service nominale pour empêcher la conduction de courant alternatif. Ce facteur explique la valeur crête de la tension de service ($\times 1,47$), la tolérance supérieure de la tension de service (par exemple $\times 1,20$), la tolérance sur la tension varistance ($\times 1,10$) et la diminution de la tension varistance par absorption d'énergie ($\times 1,34$). La tension résiduelle d'une varistance

6.3.3.1.1 Surge relevant specifications

- Impulse discharge current determined according to the expected surge parameters (lightning and HEMP).
- Residual voltage, which depends on the protection concept (see 7.3).

6.3.3.1.2 Transmission characteristics

Protective devices should limit the normal operation performance of a system or equipment as little as possible. It is therefore necessary to discuss the transmission specifications of the protective devices with the owner or operator of the line (telecom company) as well as with the manufacturer of the equipment to be protected. Annex C suggests limit values that may serve as a basis for such discussions. Lower values may be accepted by mutual agreement.

6.3.3.2 Two-wire speech and high-frequency data transmission lines

The suitable protection devices for telephone subscriber lines and other technically similar two-wire lines for frequencies between 0 MHz and 8 MHz (speech, music and high-frequency data transmission up to 2 048 kbit/s, wire broadcasting) are: gas discharge tubes (see 6.3.2.2), combinations of gas discharge tubes and two-path filters (see 6.3.2.6), and two-path protection circuits (see 6.3.2.7). Protection devices on long lines and in front of inputs or outputs should have no static voltage limiting action to ground lower than 200 V (see IEC 61000-5-5, annex A, protection circuits type a and type c). The same two criteria (surge relevant specifications and transmission characteristics) shall be considered according to the criteria given in 6.3.3.1.

6.3.3.3 Other low-power signal lines

Other low-power signal lines may be treated as described in 6.3.3.1 and 6.3.3.2. On short lines that do not leave the local grounding system, voltage-limiting devices with a limiting voltage of less than 200 V (varistors and avalanche-junction transient voltage suppressors) may be used between line and local ground if used in front of inputs or outputs.

6.3.3.4 Coaxial high-frequency lines

See 6.3.2.9.

6.3.3.5 Low-voltage power lines

Suitable protective devices are metal oxide varistors (see 6.3.2.3), non-linear resistor type arresters (see 6.3.2.4), combinations of arresters with filters (see 6.3.2.6), protection circuits (see 6.3.2.7) and safety arresters (see 6.3.2.8) for mobile equipment.

The surge relevant specifications are the following.

- Impulse discharge current, determined according to the expected surge parameters (lightning and HEMP).
- Residual voltage. The highest residual voltage mainly depends on the chosen varistor voltage and on the expected peak current. The lowest (nominal) varistor voltage shall be at least 2,5 times higher than the nominal operating voltage to prevent the conduction of a.c. current. This factor accounts for the peak value of the operating voltage ($\times 1,47$), an upper tolerance of the operating voltage (for instance $\times 1,20$), the tolerance of the varistor voltage ($\times 1,10$) and a lowering of the varistor voltage due to energy absorption ($\times 1,34$).

à oxyde métallique dont la charge est maximale est 2,5 fois supérieure à sa tension 1 mA ou, dans l'exemple ci-dessus, 6,25 fois supérieure à la tension de service nominale (par exemple 1,44 kV pour 230 V). Dans une protection progressive (voir 6.3.3.6), il est possible d'ajouter sur la même ligne deux varistances supplémentaires dont la tension (individuelle) a été augmentée de 20 % à 30 %, sans que la tension résiduelle atteigne la tension de claquage du matériel.

6.3.3.6 Coordination des dispositifs de protection

Lors de la mise en œuvre de nombreux concepts de protection (voir 8.3) et particulièrement de ceux comportant un blindage imparfait, des raisons topologiques peuvent obliger à installer plusieurs dispositifs de protection progressifs sur une même ligne. Ce peut être le cas quand un matériel comportant déjà un dispositif de protection spécifique ou limité à l'IEMN-HA (mais pas pour la foudre) est installé dans un bâtiment dont les points d'entrée sont équipés de parafoudres.

C'est aussi le cas quand une ligne traverse plusieurs zones (voir 5.2).

La mise en œuvre d'une protection progressive impose deux contraintes (voir figure 1):

- l'énergie principale d'une surtension doit être déviée par le premier dispositif de protection (élément de protection primaire, vu du côté non protégé) et ne doit pas pouvoir pénétrer davantage dans la zone protégée;
- l'élément de protection secondaire ne doit pas être détruit sauf si la charge maximale admissible par l'élément de protection primaire a été atteinte.

Dans les cas où l'introduction d'une impédance longitudinale est possible, les règles générales de découplage des dispositifs de protection primaire et secondaire peuvent être appliquées.

Deux cas particuliers peuvent se présenter.

a) Protection progressive des lignes basse tension

Sur les lignes basse tension, il n'est pas possible d'utiliser une résistance longitudinale (ohmique) pour découpler les dispositifs de protection. D'autre part, une inductance est insuffisante dans le cas d'une protection contre la foudre où il faut prévoir des surtensions de 1 ms et plus. Les courants ne peuvent être déviés de façon satisfaisante que par des varistances possédant des caractéristiques $I-U$ adéquates et/ou par des parafoudres à résistance variable.

Pour empêcher la pénétration d'un excès de courant dans la zone protégée, la tension varistance des parafoudres successifs (vus du côté non protégé) doit être augmentée de 20 % à 30 % à chaque étage. Il convient de considérer les tolérances des tensions varistance et celles sur l'exposant de non-linéarité, ainsi que le vieillissement et les capacités de charge des parafoudres pour déterminer la taille des étages de protection.

b) Protection progressive des lignes de communication et autres lignes d'acheminement des signaux

Si une ligne est uniquement équipée de limiteurs de tension (varistances, diodes protectrices), les mêmes règles que celles indiquées dans le paragraphe précédent peuvent être appliquées.

Si une ligne comporte plusieurs éclateurs à gaz, ceux-ci ne sont conducteurs qu'à tour de rôle car la tension d'arc basse (10 V à 15 V) empêche l'amorçage des autres éclateurs. Si le premier parafoudre, vu du côté non protégé, est traversé par une surtension dont le rapport du/dt est élevé (par exemple $\geq 100 \text{ kV}/\mu\text{s}$), il s'amorce. Si la tension augmente lentement (par exemple $< 100 \text{ kV}/\mu\text{s}$), le parafoudre ayant la tension d'amorçage dynamique la plus basse s'amorce et conduit la totalité du courant. Il peut très bien s'agir du dernier parafoudre de la ligne. Comme les tensions d'amorçage des différents éclateurs à gaz ne suivent pas une évolution fine, les parafoudres successifs doivent être découplés par des temporisations, ce que réalisent les filtres passe-bas ou les circuits de protection ayant une fréquence de coupure de 100 kHz par exemple (le temps de montée d'un filtre de ce type

The residual voltage of a metal oxide varistor that is loaded to its limit is another 2,5 times higher than its 1 mA voltage or, in the above example, 6,25 times higher than the nominal operating voltage (e.g. 1,44 kV for 230 V). In a stepped protection (see 6.3.3.6), two more varistors, each with a 20 % to 30 % higher varistor voltage, may be placed on the same line without the residual voltage reaching the breakdown voltage of the equipment.

6.3.3.6 Coordination of protective devices

In many protection concepts (see 8.3) and especially in those with an imperfect shield, for topological reasons it might be necessary to install several protective devices in a stepped fashion on the same line. This may be the case when an equipment that already contains a specific protection or a protection that is designed only for HEMP (but not for lightning) is installed in a building with a lightning protection at its point of entry.

Another example would be when a line passes through several zones (see 5.2).

In all stepped protections two requirements shall be observed (see figure 1):

- the main energy of the surge shall be diverted by the first protective device (primary protection element, as seen from the unprotected side) and not be allowed to penetrate further into the protected area;
- the secondary protection element shall not be destroyed unless the primary protection element has reached its limits.

In cases where a longitudinal impedance can be introduced, the general rules concerning decoupling of primary and secondary protection elements may be applied.

Two specific cases should be considered.

a) Stepped protection on low-voltage power lines

On low voltage power lines, no longitudinal (ohmic) resistance can be used to decouple the protection elements. Also, an inductance is not sufficient in the case of lightning protection where surges of 1 ms and longer must be expected. The correct diversion of currents can only be obtained by choosing varistors with appropriate $I-U$ characteristics and/or non-linear resistor type arresters.

In order to prevent excessive currents from penetrating into the protected area, the varistor voltage of consecutive arresters (as seen from the unprotected side) shall be higher by 20 % to 30 % in each step. When determining the step size, the tolerances of varistor voltages and the tolerances in the non-linearity exponent, as well as the ageing and current-carrying capabilities of the arresters, should be considered.

b) Stepped protection on communication and other signal lines

If only voltage-limiting devices (varistors, protective diodes) are used on a line, then the same rules as shown in the previous paragraph may be applied.

If more than one gas discharge tube is used on a line, only one of them may be in the conducting state at a time, because the low arcing voltage (10 V to 15 V) will prevent the others from firing. Under a surge with a high du/dt ratio (e.g. ≥ 100 kV/ μ s), the first arrester as seen from the unprotected side will fire. If the voltage rises slowly (e.g. < 100 kV/ μ s), the arrester with the lowest dynamic sparkover voltage will fire and then carry the whole current. This could well be the last arrester on the line. As gas discharge tubes are not available in a fine gradation of sparkover voltages, the consecutive arresters shall be decoupled by time delays as provided by low-pass filters or protective circuits with a cut-off frequency of, for instance, 100 kHz (such a filter would have a rise time of about 2 μ s).

serait d'environ 2 μ s). Le parafoudre suivant ne s'amorcerait donc que si une quantité supplémentaire d'énergie était induite sur la ligne entre le premier parafoudre et un des suivants. Le courant dévié par ce dernier ne proviendrait également que de cet apport supplémentaire d'énergie.

Une troisième hypothèse suppose que le premier parafoudre soit constitué par un éclateur à gaz et le suivant par un limiteur de tension. Dans ce cas, la tension d'écrêtage maximale du limiteur doit être supérieure à la tension d'amorçage statique de l'éclateur à gaz, sinon il faudrait découpler les deux dispositifs.

7 Principes de protection

7.1 Considérations générales

Quand un concepteur ou un constructeur sélectionne un principe de protection, il doit tout d'abord se demander s'il doit ou non protéger l'installation ou le matériel contre l'IEMN-HA, ce qui l'oblige à répondre aux questions suivantes:

- est-il ou non important que l'installation ou le matériel résiste à l'IEMN-HA ? Dans certains cas, il est important que seule une partie d'une installation résiste;
- quel est le niveau d'immunité du matériel de l'installation ?

Quand la décision de protéger a été prise, on doit définir le degré de protection à partir des critères concernant

- le niveau d'immunité du matériel dans l'installation;
- la nécessité que le fonctionnement du matériel dans l'installation donne satisfaction, quel que soit son mode de fonctionnement;
- la possibilité ou l'impossibilité que ce matériel cesse de fonctionner pendant un certain temps.

Si l'option de ne pas protéger est retenue, il est possible d'utiliser certains écrans protecteurs existants (bâtiments en béton armé, câbles enterrés, baies ou boîtes métalliques), qui assurent une certaine réduction de champ. Il est aussi possible d'utiliser les parafoudres déjà installés pour atténuer les perturbations conduites.

7.2 Considérations topologiques

D'un point de vue topologique, deux approches sont envisageables:

- a) la protection globale d'une ou de plusieurs installations sur la base de principes de topologie du blindage;
- b) une protection répartie de chaque installation ou de chaque matériel d'une installation incluant un durcissement au niveau du matériel.

Si le principe de protection globale est retenu, la totalité de l'installation (qui peut se composer de plusieurs équipements interconnectés) se trouvera dans un environnement protégé dont le degré de protection est déterminé comme indiqué en 7.3.1. Les installations situées dans des cages blindées ou dans des bâtiments en béton armé avec barres nervurées constituent des exemples de protection globale.

Si le principe de protection répartie est retenu,

- chaque matériel doit être durci conformément aux indications de 7.1;
- les câbles de connexion entre les équipements doivent être durcis conformément aux indications des 5.5 et 7.1, qui s'appliquent à tous les équipements auxquels ces câbles sont reliés.

A consecutive arrester would then only fire if additional energy were induced on the line between the first and one of the consecutive arresters. The current diverted by the consecutive arrester would also be due only to this additional amount of energy.

In a third scenario, a gas discharge tube could be installed as a first arrester and a voltage-limiting device as a consecutive one. In such a case, the maximum clamping voltage of the voltage-limiting device shall be higher than the static sparkover voltage of the gas discharge tube, or the two devices would have to be decoupled from each other.

7 Protection concepts

7.1 General considerations

When a designer or a manufacturer chooses a protection concept, the first question to answer shall be whether or not to provide installation or equipment protection against HEMP. The answer to this question will depend on

- the importance for the installation or the equipment to survive HEMP. It should be noted that, in some cases, only a part of the installation need survive;
- the immunity level of the equipment in the installation.

Once the decision to protect has been taken, the protection degree shall be determined from criteria which pertain to

- the immunity level of the equipment in the installation;
- the necessity for the equipment in the installation to work in all modes of operation;
- considerations on whether interruptions of a certain time duration are permitted or not.

If the non-protection option is chosen, advantage can be taken from already existing protection barriers such as reinforced concrete buildings, buried cables, metallic racks or boxes, which provide a certain field reduction. Another type of attenuation which can be used for conducted disturbances is the already existing lightning protection.

7.2 Topological considerations

From a topological point of view, two possible approaches can be considered:

- a) global protection of one or several installations based on topological shielding concepts;
- b) distributed protection of each installation or each equipment of one installation which includes hardening at the equipment level.

If global protection is chosen, the whole installation, which can consist of several interconnected equipments, will find itself in a protected environment whose degree of protection is determined according to 7.3.1. Examples of global protection are the installations placed in concrete buildings with rebars or in shielded rooms.

If the distributed protection is chosen,

- each individual equipment shall be hardened to a degree corresponding to considerations introduced in 7.1;
- the connection cables between the equipment shall be hardened to a degree corresponding to considerations introduced in 5.5 and 7.1, which apply to all the equipment to which these cables are connected.

Exemples de protection distribuée:

- équipements montés dans des armoires fermées mais pour lesquels aucune construction spéciale n'est prévue (pas de joints haute fréquence sur les portes, pas de structures en nid d'abeille sur les ouvertures de ventilation);
- matériels montés dans des armoires blindées avec câbles blindés ou entrées filtrées.

Pour les applications civiles, le matériel peut être installé dans des bâtiments en utilisant du béton armé (avec barres nervurées), ce qui assure un certain degré de protection, comme indiqué en 6.3. Cependant, il ne s'agit en aucun cas de la mise en œuvre d'un élément du principe de protection globale. Des cages blindées qui constituent une protection répartie sont généralement utilisées dans les installations civiles quand une protection spéciale s'avère nécessaire. Dans certains cas très particuliers, il est possible d'utiliser des cages blindées de grande dimension possédant une atténuation supérieure à 60 dB pour obtenir une protection globale.

7.3 Définition des principes de protection

Un principe de protection définit les idées fondamentales qui guident le lecteur et lui permettent de se procurer un matériel, un système ou un bâtiment résistant à l'IEMN-HA. Comme le présent rapport technique concerne d'abord les applications civiles, les matériels durcis contre l'IEMN-HA sont constitués de circuits ou de composants électroniques et électriques classiques, parfois montés dans un boîtier spécial. Les principes définis ci-après concernent principalement le boîtier et les interconnexions au niveau du matériel et/ou du système et non les règles de conception des circuits.

7.3.1 Principes de protection des bâtiments

Les principes de protection des bâtiments prennent en compte les environnements rayonnés et les environnements conduits, et sont résumés dans le tableau 1.

En ce qui concerne les applications civiles de l'atténuation de champ, les bâtiments ont été divisés en deux classes seulement, selon leur matériau de construction:

- la classe 1 (1A et 1B) concerne les matériaux qui n'atténuent pas le champ électromagnétique;
- la classe 2 (2A et 2B) concerne les matériaux qui assurent une atténuation sensible du champ électromagnétique.

Cette atténuation doit être au moins égale à 20 dB, ce qui est garanti par le béton armé ordinaire avec barres nervurées, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter d'autres types de blindage spéciaux. Tout blindage supplémentaire peut renforcer l'atténuation. C'est à l'utilisateur de décider s'il est besoin d'augmenter le blindage du matériel à protéger. Le propriétaire de l'installation peut utiliser les méthodes d'essais décrites dans la CEI 61000-4-23 pour déterminer le degré de protection offert par le bâtiment. Le propriétaire d'un équipement peut utiliser la CEI 61000-2-11 pour classer les environnements à l'intérieur du bâtiment et les méthodes d'essais de la CEI 61000-4-25 pour évaluer l'immunité des équipements qui s'y trouvent.

Tableau 1 – Principes de protection des bâtiments

		Protection en conduction	
		Non protégé	Protégé*
Atténuation en rayonnement (dB) 100 kHz à 30 MHz	0	1A	1B
	> 20	2A	2B
* Protection contre les surtensions de foudre. Cela signifie que 2B comporte une protection de surtension conduite mais n'a pas de filtrage supplémentaire.			

Examples of distributed protection are:

- equipment in closed cabinets but for which no special construction is foreseen (no high-frequency gaskets on the doors, ventilation apertures without honeycomb structures);
- equipment in shielded cabinets with shielded cable or filtered entries.

For civil applications, equipment can be installed in buildings with reinforced concrete (with rebars) which provide a certain degree of protection, as discussed in 6.3. However, this should not be considered a part of a global protection concept. When a particular protection is needed, shielded cages which represent a distributed protection are generally used for civil installations. In very special cases, large shielded cages with attenuations higher than 60 dB can be considered for global protection.

7.3 Definition of protection concepts

A protection concept describes the fundamental ideas that guide the reader to achieve a HEMP resistant equipment, system or building. As this technical report aims primarily at civil applications, the HEMP-hardened equipment consists of the usual conventional electronic and electric components or circuits, sometimes in special housings. The following concepts deal mainly with housing and interconnections at the equipment and/or system level and not with circuit design rules.

7.3.1 Building protection concepts

Building protection concepts consider both radiated and conducted environments. These concepts are summarized in table 1.

Concerning civil applications of field attenuation, only two classes of buildings are considered, as a function of the building material:

- class 1 (1A and 1B) is related to materials which provide no attenuation of the electromagnetic field;
- class 2 (2A and 2B) is related to materials which provide some significant attenuation of the electromagnetic field.

This attenuation shall be at least 20 dB, a level which is given by an ordinary concrete material with rebars and no other special shielding measures. Any additional shielding can increase the attenuation. It is up to the user to determine if the equipment to be protected inside the building needs additional building shielding. The owner of the facility can use the test methods described in IEC 61000-4-23 to determine the shielding effectiveness of the building. The owner of an equipment can use IEC 61000-2-11 to classify the environments inside the building and the test methods described in IEC 61000-4-25 to evaluate the immunity of the equipment inside.

Table 1 – Building protection concepts

		Conducted protection	
		Not protected	Protected*
Radiated attenuation dB 100 kHz to 30 MHz	0	1A	1B
	> 20	2A	2B

* Lightning overvoltage protection. This means that 2B includes an overvoltage conducted protection but not additional filtering.

La bande de fréquence a été limitée à 30 MHz car, au-dessus, la structure ordinaire métallique d'un bâtiment n'assure pas une atténuation suffisante.

En ce qui concerne l'environnement conduit, deux classes ont été définies:

- la classe A (1A et 2A) si les conducteurs qui pénètrent dans le bâtiment ne sont pas protégés contre les surtensions;
- la classe B (1B et 2B) si un dispositif de protection contre les surtensions de foudre (SPD: surge protection device ou parasurtenseur) est monté à l'entrée des conducteurs dans le bâtiment.

La classe A n'est pas applicable en ce qui concerne le principe de protection IEMN-HA. Dans ce cas, on doit installer un matériel ou un système adapté

- soit dans un bâtiment équipé d'au moins un dispositif de protection contre les surtensions de foudre;
- soit dans une enceinte blindée (voir tableau 2).

Un bâtiment de classe A n'assurera donc aucune atténuation de l'environnement externe conduit IEMN-HA, mettant ainsi tout le poids de la protection sur d'autres blindages à l'intérieur du bâtiment (pour des détails concernant la classification des environnements IEMN-HA, voir la CEI 61000-2-11).

Si des calculs ou des essais montrent que le dispositif de protection contre les surtensions de foudre ne diminue pas suffisamment la menace présentée par l'IEMN-HA, le client peut choisir un dispositif de protection spécifique contre ce type de perturbation.

7.3.2 Principes de protection des enceintes blindées

Les principes de protection des enceintes blindées sont résumés dans le tableau 2. Ces enceintes peuvent être installées à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, selon le matériel à protéger.

Tableau 2 – Principes de protection des enceintes blindées

		Protection en conduction	
		Non protégé*	Protégé**
Atténuation en rayonnement (dB) 1 MHz à 200 MHz	≥ 20	–	3
	≥ 40	–	4
	≥ 60	–	5
	≥ 80	–	6
* Cette colonne n'a été conservée que pour des raisons de symétrie avec le tableau 1.			
** Surtension de foudre et filtrage.			

L'approche adoptée pour les principes de protection des bâtiments a été conservée, c'est-à-dire qu'il est tenu compte des environnements rayonné et conduit. Dans le cas d'une enceinte blindée, il serait absurde qu'un conducteur pénétrant dans un boîtier ne soit pas protégé contre les surtensions. Cependant, la colonne «Non protégé» a été conservée pour des raisons de symétrie avec le tableau 1.

Les valeurs de l'atténuation indiquées dans le tableau 2 concernent l'atténuation du champ électrique, du champ magnétique haute fréquence et des ondes planes (~1 MHz à 200 MHz). A basse fréquence, l'atténuation d'un champ magnétique est beaucoup plus faible. Cependant, le terme d'excitation dû à la composante de champ magnétique apparaît dans l'équation de couplage sous la forme ωB , dans laquelle $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence et B la composante de

The frequency band has been limited to 30 MHz because, for higher frequencies, the usual rebar structure of a building does not provide sufficient attenuation.

Concerning the conducted environment, two situations are considered:

- class A (1A and 2A) if no protection against surges exists on the conductors which penetrate into the building;
- class B (1B and 2B) if there is a protection against lightning overvoltages (SPD, i.e. surge protection device) installed at the entrance of the conductors in the building.

Class A is not relevant for HEMP protection. For this type of protection, a sensitive equipment or system shall be installed

- either in a building which has at least a lightning overvoltage protection;
- or in a shielded enclosure (see table 2).

Therefore, a class A building will not provide any reduction of the external conducted HEMP environments, placing the burden of the HEMP protection on other enclosures inside the building. See IEC 61000-2-11 for details concerning the classification of the HEMP environments.

If calculations or tests show that the SPD against lightning is not sufficient to decrease the HEMP threat to a desired level, a specific HEMP protection can be chosen by the customer.

7.3.2 Protection concepts for shielded enclosures

Shielded enclosure protection concepts are summarized in table 2. These shielded cages can be installed inside the buildings or outside, depending on the equipment to be protected.

Table 2 – Protection concepts for shielded enclosures

		Conducted protection	
		Not protected*	Protected**
Radiated attenuation dB 1 MHz to 200 MHz	≥ 20	–	3
	≥ 40	–	4
	≥ 60	–	5
	≥ 80	–	6

* This column has been maintained only for symmetry purposes with table 1.

** Lightning overvoltage and filtering.

The same approach as for building protection concepts has been adopted, i.e. both the radiated and conducted environments are considered. For shielded enclosures, a conductor which penetrates into a cage without any surge protection makes no sense. However, for symmetry with table 1, the column "Not protected" has been maintained.

The attenuation figures provided in table 2 refer to electric field, high-frequency magnetic field and plane wave attenuations (~1 MHz to 200 MHz). At low frequencies, the magnetic field attenuation is much lower. However, the forcing term due to the magnetic field component enters the coupling equation as ωB , where $\omega = 2\pi f$, with f being the frequency and B the

champ magnétique normale au plan contenant le circuit à protéger. De ce fait, à basse fréquence, par suite de la faible valeur de ω , elle jouera un rôle moins important dans l'apparition des tensions et courants induits.

8 Comparaison entre les mesures de protection contre les perturbations conduites dues à l'IEMN-HA et les impulsions électromagnétiques dues à la foudre (IEMF)

8.1 Généralités

La protection contre la foudre concerne principalement l'environnement primaire conduit créé par les coups de foudre directs. Cependant, des études de plus en plus nombreuses sont menées sur les effets indirects de l'environnement secondaire conduit. Les surtensions types dues à l'IEMN-HA et à la foudre ont des amplitudes et des formes d'ondes différentes. Le tableau 3 présente des valeurs moyennes typiques prévisibles des courants de court-circuit dus à la foudre sur une ligne téléphonique aérienne d'abonné d'une longueur de 1 km et l'environnement conduit de l'IEMN-HA obtenu par le calcul avec une probabilité de 50 %. Les courants de foudre indiqués dans le tableau ci-dessous comme des formes d'ondes standard peuvent être très différents dans la nature.

Tableau 3 – Formes d'ondes de courant de foudre et d'IEMN-HA utilisables pour des essais

Événement	Amplitude, forme d'onde	Remarques
Foudre – coup de foudre direct – coup de foudre indirect	30 kA, 10/350 μ s 5 kA, 8/20 μ s	Valeurs moyennes évaluées de courant crête à l'extrémité de la ligne. Les valeurs crêtes maximales peuvent être cinq à six fois supérieures.
IEMN-HA – initiale – intermédiaire – finale	500 A, 10/100 ns 150 A, 25/1,5 ms 15 V, 1/50 s	Probabilité 50 % $\sigma_g = 10^{-3}$ S/m

Quand les lignes sont plus courtes, la probabilité d'une surtension due à la foudre diminue, mais la probabilité qu'un courant de foudre dû à un coup de foudre direct arrive à l'extrémité de la ligne avec sa valeur maximale augmente. Pour l'IEMN-HA initiale, la valeur du courant de crête augmente de façon linéaire avec la longueur de la ligne jusqu'à environ 200 m puis reste pratiquement constante. Pour l'IEMN-HA intermédiaire, au-dessous de 100 m, le courant induit est pratiquement négligeable, puis il augmente de façon plus ou moins linéaire entre 100 m et 1 000 m.

Un des buts de cet article est de mettre l'accent sur les mesures de protection combinées contre la foudre et l'IEMN-HA. Dans les paragraphes ci-dessous, les conséquences des deux types d'agressions sur les lignes de grande longueur ($L \approx 1$ km) sont analysées pour évaluer leur effet sur la combinaison de ces deux moyens de protection.

8.2 Courant de crête $\hat{i}$

Ce paramètre n'est responsable que des chutes de tension sur les résistances, par exemple sur la résistance de terre. En cas de coup de foudre direct, le potentiel de terre local d'une zone protégée peut être élevé de plusieurs centaines de kilovolts par rapport à un point distant. Cela peut provoquer des claquages diélectriques imprévisibles à la terre dans la zone protégée. Ce phénomène ne concerne que la foudre et les installations dont le blindage ou le circuit de mise à la terre est défectueux. En général, le paramètre $d\hat{i}/dt$ a un effet beaucoup plus important sur les chutes de tension inductives.

magnetic field component perpendicular to the plane containing the circuit to be protected. This means that, at low frequencies, its contribution to the induced voltages and currents will not be as important due to the low value of ω .

8 Comparison of protection measures against conducted disturbances due to HEMP and lightning electromagnetic pulse (LEMP)

8.1 General

Lightning protection deals mainly with the primary lightning conducted environment due to direct strokes. However, more and more consideration is given to the secondary lightning conducted environment due to the indirect effect. Typical HEMP- and lightning-induced surges differ in amplitude and waveform. As an example, table 3 shows test lightning parameters corresponding to average short-circuit currents to be expected on an overhead telephone subscriber line of 1 km in length, and the calculated HEMP conducted environment for a 50 % probability. Note that the lightning currents which are given here as normal waveforms may be considerably different in nature.

Table 3 – Lightning and HEMP current waveforms which can be used for tests

Event	Amplitude, waveform	Remarks
Lightning		
– direct stroke	30 kA, 10/350 μ s	Estimated average peak current values at the end of the line. Maximum peak values may be five to six times higher
– indirect stroke	5 kA, 8/20 μ s	
HEMP		
– early-time	500 A, 10/100 ns	Probability 50 % $\sigma_g = 10^{-3}$ S/m
– intermediate-time	150 A, 25/1,5 ms	
– late-time	15 V, 1/50 s	

As lines become shorter, the probability of lightning surge occurrence goes down, but direct strokes have a higher probability to reach the end of the line with full energy. For early-time HEMP, the current peak value increases linearly with the line length up to about 200 m, then remains practically constant. For intermediate-time HEMP, below 100 m, the induced current is practically negligible, then it increases more or less linearly between 100 m and 1 000 m.

It is one of the purposes of this clause to emphasize combined protection measures against lightning and HEMP. In what follows, the consequences of the two threats on such combined protection measures are analyzed by looking at basic surge parameters on long lines ($L \approx 1$ km).

8.2 Peak current $\hat{i}$

This parameter is only responsible for voltage drops on resistances, e.g. the grounding resistance. In a direct lightning stroke, the local ground potential of a protected area may be raised by several hundreds of kilovolts relative to a distant point. This may result in unpredictable dielectric breakdowns to ground in the protected area. The phenomenon is clearly limited to lightning events and to installations with an imperfect shield or an unfavourable grounding system. In most cases, the effect of $d\hat{i}/dt$ on inductive voltage drops is much more important.

8.3 di/dt maximal

Les chutes de tension inductives et les tensions induites sont proportionnelles à di/dt . C'est en général ce paramètre qui pose les problèmes les plus fréquents et les plus graves en matière de protection. Dans le cas de coups de foudre directs, la valeur di/dt théorique choisie peut atteindre 100 kA/μs à 200 kA/μs selon le degré de protection fixé (voir tableau A.3). Pour l'IEMN-HA initiale, il existe une probabilité de 90 % que ce paramètre atteigne 150 kA/μs (voir tableau A.1). Bien que la valeur de ce paramètre soit plus élevée que pour la foudre, elle reste dans le même ordre de grandeur et le problème posé peut être résolu par les mêmes méthodes conceptuelles.

8.4 du/dt maximal

Ce paramètre n'est applicable aux parasurtenseurs qu'avec beaucoup de précaution. Les temps de croissance de la tension indiqués dans la documentation scientifique sont basés sur des calculs de couplage supposant certaines formes d'ondes de courant ou de champ et des paramètres de ligne linéaires. Les valeurs types sont de l'ordre de quelques kV/μs pour la foudre et de l'ordre du kV/ns pour l'IEMN-HA initiale. Elles ne tiennent généralement pas compte des effets non linéaires comme le claquage de l'isolation et l'allumage des parasurtenseurs à gaz qui peuvent se produire en moins d'une nanoseconde, même pendant un événement dû à la foudre. Ces valeurs négligent également les effets de l'ionisation et les pertes de ligne dans la plage des 100 MHz. En supposant que la ligne ait une caractéristique passe-bas, du/dt maximal est proche de la moitié de la tension crête théorique, qui peut atteindre plusieurs centaines de kilovolts ou même le mégavolt pour la foudre et l'IEMN-HA initiale. Il est certain qu'à des valeurs plus faibles (la plupart des éléments de protection primaire passent de l'état isolant à l'état conducteur bien au-dessous de 10 kV), du/dt est inférieur à $(du/dt)_{\max}$. Si l'on considère les conditions les plus défavorables, les calculs vont de 100 kV/μs à 1 kV/ns pour la foudre et de 1 kV/ns à 10 kV/ns pour l'IEMN-HA initiale. Cette incertitude est due avant tout au manque de modèles de calculs pour les fréquences supérieures à 100 MHz et à l'insuffisance des connaissances sur les paramètres de ligne non linéaires.

8.5 Intégrale $i \times dt$

L'intégrale $i \times dt$ est la charge transférée pendant la surtension. Elle varie de 50×10^{-6} As pour l'IEMN-HA initiale à 70 As pour un coup de foudre direct très puissant. Comme les dispositifs à avalanche et limiteurs de tension ont par ailleurs une action stabilisatrice sur cette dernière (une impédance très basse au-dessus d'une tension de seuil type), leur capacité de charge peut être approximativement décrite par l'intégrale $i \times dt$. Un parasurtenseur à gaz de 8 mm × 8 mm subit une sollicitation à peu près identique de la part d'un coup de foudre indirect de 12 kA, 8/20 μs et de l'IEMN-HA intermédiaire.

8.6 Intégrale $i^2 \times dt$

L'intégrale $i^2 \times dt$ est le paramètre proportionnel à l'énergie de la surtension. L'unité A²s est équivalente à l'unité J/Ω et indique l'énergie qui peut être absorbée par une résistance de 1 Ω. Comme les parasurtenseurs ont une faible résistance dynamique, de l'ordre du milliohm, ils n'absorbent qu'une partie relativement faible de l'énergie potentielle. La capacité d'absorption d'énergie d'un parasurtenseur n'est donc pas un critère de qualité déterminant. L'intégrale $i^2 \times dt$ est plusieurs milliers de fois plus grande dans un coup de foudre que dans l'IEMN-HA. Elle joue un rôle dans les effets thermiques des résistances ohmiques, par exemple sur la capacité de charge des câbles, et dans les effets magnétodynamiques dans les boucles de courant. Des ondes de choc de courant élevées et courtes (par exemple 40 kA, 8/20 μs) peuvent provoquer la destruction mécanique d'un dispositif de protection à gaz de 8 mm × 8 mm avant de le détruire thermiquement.

8.3 Maximum di/dt

Inductive voltage drops and induced voltages are proportional to di/dt . In general, it is this parameter that gives rise to the most common and most severe problems in all protection concepts. For direct lightning strokes, the di/dt value chosen for the protection concept may be as high as 100 kA/ μ s to 200 kA/ μ s depending on the admitted protection level (see table A.3). In early-time HEMP, this parameter attains 150 kA/ μ s for a 90 % probability (see table A.1). Although higher than for lightning, this value is still in the same order of magnitude and can be met with the same conceptual methods.

8.4 Maximum du/dt

This parameter may be applied to surge protectors only with great caution. Voltage rise times given in literature are based on coupling calculations assuming certain field or current waveforms and linear line parameters. Typical values are in the range of a few kV/ μ s for lightning events and in the range of kV/ns for early-time HEMP. They usually do not consider non-linear effects such as insulation breakdown and firing actions of gas filled surge arresters which may occur in the sub-nanosecond range, even in the course of a lightning event. They also neglect ionisation effects and line losses in the 100 MHz frequency range. Assuming a low-pass characteristic for the line, the maximum du/dt will occur somewhere near half the theoretical peak voltage level, which may be as high as several hundreds of kilovolts or even in the megavolt range for lightning and early-time HEMP. There is no doubt that, at lower levels (most primary protection elements switch from the insulating into the conducting state well below 10 kV), du/dt is smaller than $(du/dt)_{\max}$. Current worst case estimates are 100 kV/ μ s to 1 kV/ns for lightning and 1 kV/ns to 10 kV/ns for early-time HEMP events. This uncertainty is mostly due to insufficient calculating models for frequencies above 100 MHz and a limited knowledge concerning non-linear line parameters.

8.5 Integral $i \times dt$

Integral $i \times dt$ is the charge transferred during the surge. Values vary from 50×10^{-6} As for an early-time HEMP, to 70 As in a very powerful direct lightning stroke. As most voltage-breakdown and voltage-limiting devices exhibit a distinct voltage-stabilizing action (a very low impedance above a typical threshold voltage), their current-carrying capability may approximately be described in terms of integral $i \times dt$. A 8 mm $\times$ 8 mm gas filled arrester is about equally stressed by an indirect lightning stroke of 12 kA, 8/20 μ s and the intermediate-time HEMP.

8.6 Integral $i^2 \times dt$

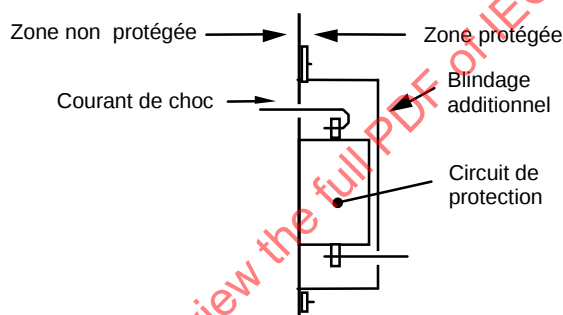
Integral $i^2 \times dt$ is the energy-proportional parameter of the surge. The unit A²s is equivalent to the unit J/ Ω and gives the energy that would be absorbed in a resistance of 1 Ω . As surge arresters have a low dynamic resistance, in the milliohm range, they absorb only a comparatively small part of the potential energy. The capacity for energy absorbance of a surge arrester is not therefore a relevant quality criterion. Integral $i^2 \times dt$ is several thousand times higher in a lightning stroke than in HEMP. It is relevant for thermal effects in ohmic resistances, e.g. in the current-carrying capability of cable wires, and magneto-dynamic effects in current loops. Short powerful current surges (for example 40 kA, 8/20 μ s) may mechanically destroy an 8 mm $\times$ 8 mm gas-filled protector before it is thermally destroyed.

8.7 Durée à mi-valeur

La durée à mi-valeur (pendant l'affaiblissement de l'impulsion) de la forme d'onde de courant est un des facteurs les plus importants des circuits de protection, c'est-à-dire des associations d'éléments de protection primaire et secondaire. Elle varie d'environ 100 ns pour l'IEMN-HA initiale à 350 μ s pour un coup de foudre direct et 1,5 ms pour l'IEMN-HA intermédiaire. Etant donné sa faible tension, l'IEMN-HA finale ne pose généralement pas de problème de cet ordre et n'est donc pas étudiée ici.

8.8 Conclusions sur la comparaison entre la protection IEMN-HA et la protection IEMF

Exception faite du paramètre du/dt , les perturbations conduites dues à la foudre représentent une menace plus grave que celles dues à l'IEMN-HA. On doit cependant aussi tenir compte de l'éventuelle détérioration de l'atténuation du blindage si des dispositifs de protection contre les perturbations conduites sont installés. Pour des raisons financières et parce qu'il est rare qu'une protection contre des champs rayonnés soit installée, les parafoudres ne sont généralement pas conçus comme des protections traversantes. Ils dégradent alors l'atténuation du blindage d'un dispositif de protection IEMN-HA, sauf s'ils ont été installés avec un soin particulier. Le plus important est d'empêcher le courant de choc de rayonner dans la zone protégée. On doit, pour cela, installer au moins la protection primaire à l'extérieur du blindage ou ajouter un blindage supplémentaire (voir figure 5).



IEC 806/99

Figure 5 – Dispositif empêchant le rayonnement du courant de choc dans la zone protégée

En supposant que l'installation est bien faite, un dispositif de protection «foudre seule» bien conçu peut être transformé en dispositif de protection «foudre + IEMN-HA» pour un coût minimal. Il convient de ne pas choisir un dispositif de protection «IEMN-HA seule», sauf si la menace de la foudre peut être entièrement écartée.

8.7 Time to half-value

The time to half-value (on the pulse decay) of the current waveform is one of the most important determinants for protection circuits, i.e. combinations of primary and secondary protection elements. It varies from approximately 100 ns in the early-time HEMP to 350 μ s in a direct lightning stroke and 1,5 ms in the intermediate-time HEMP. Because of its low voltage, the late-time HEMP is usually no problem in this respect and is therefore not considered here.

8.8 Conclusions on the comparisons between HEMP and LEMP protection

Except for du/dt , lightning represents a more severe threat than HEMP as far as conducted disturbance is concerned. However, possible degradation of shield attenuation from the installation of protection devices against conducted disturbance shall also be considered. For economic reasons, and because a radiation shield is absent in most cases, lightning protection elements are usually not designed as feedthrough elements. They tend, therefore, to degrade the shield attenuation of a HEMP protection concept, unless special care is taken in their installation. The most important rule to observe is that the surge current shall not radiate into the protected zone. This can be achieved by installing at least the primary protection element outside the shield or by adding a supplementary shield, as shown in figure 5.

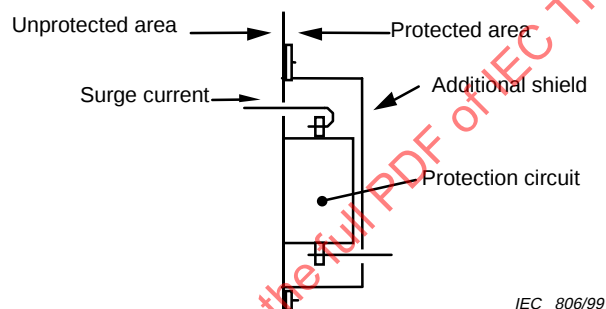


Figure 5 – Solution to prevent surge current from radiating into protected area

Assuming that an installation is correctly carried out, a well-designed "lightning only" protection concept may be transformed into a "lightning + HEMP" concept at almost no additional cost. A "HEMP only" concept should not be chosen unless lightning threats can be completely excluded.

Annexe A

Environnements de rayonnement dus à l'IEMN-HA initiale et à la foudre

A.1 Généralités

Des courbes uniques de la variation des trois composantes du champ électrique d'une IEMN-HA (initiale, intermédiaire et finale) en fonction du temps sont définies dans la CEI 61000-2-9. Le comportement de ces champs électriques en fonction du temps et de la fréquence est illustré par la figure A.1. Comme on suppose toujours que l'IEMN-HA initiale (E_1) est une onde plane car émise par une source distante (>30 km), le champ magnétique est obtenu à partir du champ électrique à l'aide de l'expression $E/H = Z_0$, dans laquelle Z_0 est l'impédance de l'onde en espace libre.

La forme et l'intensité du champ de la foudre dépendent de la distance du point d'impact. Ses courbes types pour différentes distances ont été définies sur la base de mesures de foudre naturelle ou artificielle, ce qui a permis d'obtenir une grande diversité d'environnements rayonnés dus à la foudre. Cependant, comme habituellement seuls les coups de foudre proches ont des conséquences électromagnétique dommageables, il est raisonnable de ne tenir compte que des distances égales ou inférieures à 1 km, ce qui permet de ne sélectionner qu'une seule forme de champ magnétique et électrique en fonction du temps.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-5-3:1999

Annex A

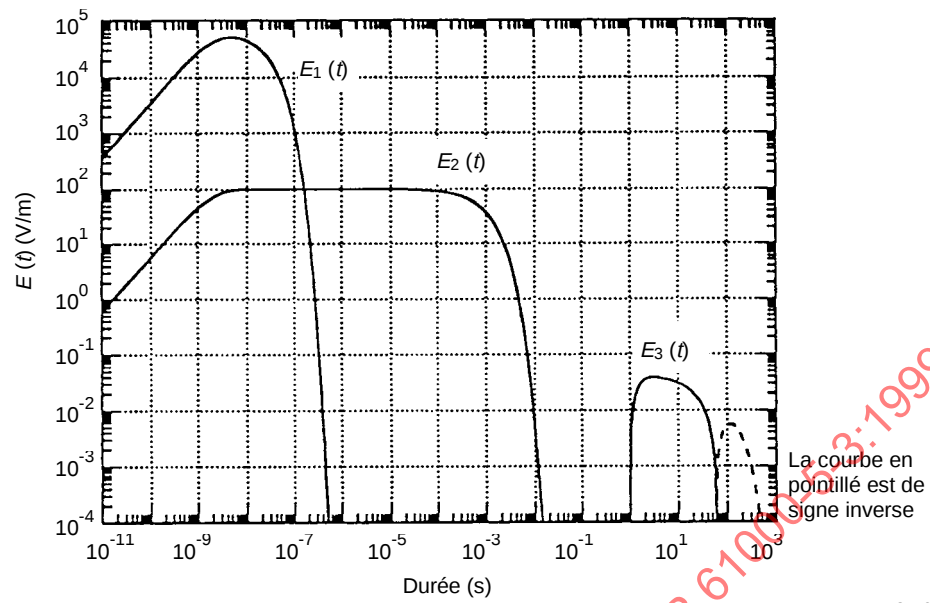
Early-time HEMP and lightning radiated environments

A.1 General

For HEMP, unique curves of the three electric field components type (early-, intermediate- and late-time) vs. time have been defined in IEC 61000-2-9. The behaviour of the electric fields in the time and frequency domains are shown in figure A.1. As it is always assumed that the early-time (E1) HEMP is a plane wave due to a distant effective source (>30 km), the magnetic field results from the electric field using $E/H = Z_0$, where Z_0 is the free-space wave impedance.

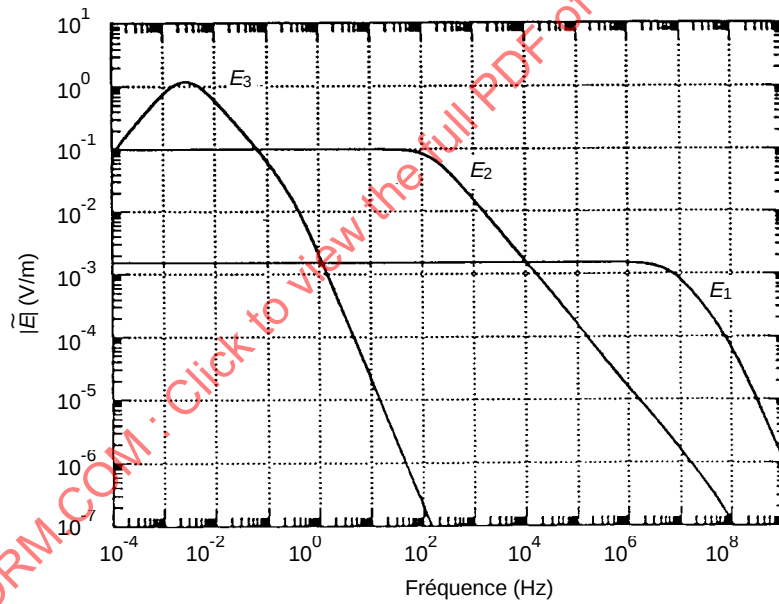
For lightning, the field shape and intensity depend on the distance to the striking point. Typical curves for different distances have been defined based on measurements of natural or artificially triggered lightning. This gives a large variety of radiated environments due to lightning. However, taking into account the fact that only nearby lightning strokes usually produce an adverse electromagnetic effect, it is reasonable to consider only those distances not exceeding 1 km, which makes it possible to select just one single shape of electric and magnetic lightning fields vs. time.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61000-5-3:1999



IEC 807/99

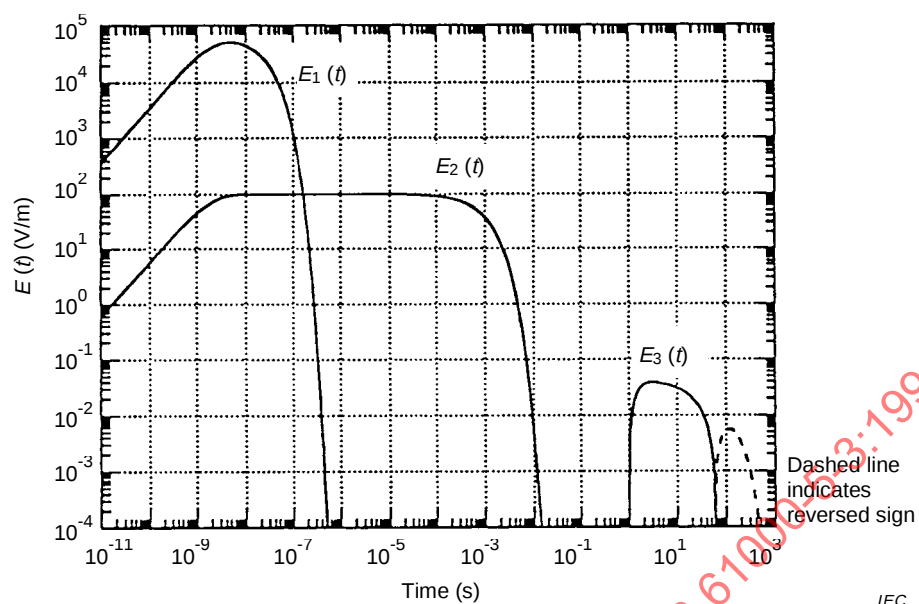
Figure A.1a – Comportement en fonction du temps



IEC 808/99

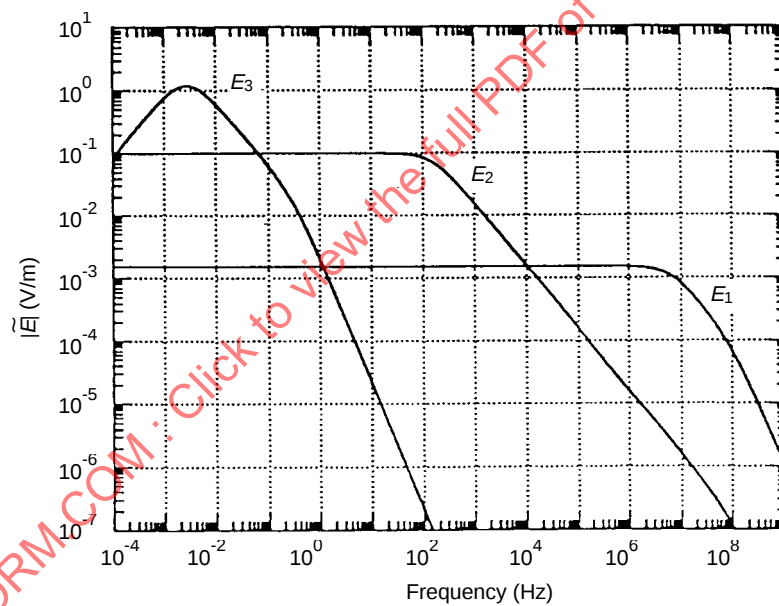
Figure A.1b – Comportement en fonction de la fréquence

Figure A.1 – Comportement en fonction du temps et de la fréquence des composantes du champ électrique de l'ITEMN-HA



IEC 807/99

Figure A.1a – Time domain behaviour



IEC 808/99

Figure A.1b – Frequency domain behaviour

Figure A.1 – Time and frequency domain behaviour of the electric field components of HEMP

La figure A.2 compare le comportement dans le temps et le spectre des fréquences des composantes du champ électrique IEMN-HA d'une part et de celles du premier arc en retour et des arcs en retour subséquents d'autre part.

Le spectre des fréquences IEMN-HA correspond au champ électrique standard de l'onde initiale illustré par la figure A.1. L'intensité du champ IEMF dépend de la distance du point d'impact. Le choix d'une distance située dans une zone qui a une probabilité statistique d'être frappée par la foudre au moins une fois par an constitue un bon compromis. Pour un niveau kéraunique N_k , une formule empirique donne la densité d'impact suivante:

$$N_s = N_k/7 \quad 1/\text{km}^2/\text{an} \quad (\text{A.1})$$

Pour un niveau kéraunique de 30, on obtient quatre coups au kilomètre carré par an, ce qui représente un bon compromis dans la plage de 80 à 100, valable en zones tropicales, et la valeur 10, qui correspond aux zones septentrionales du globe. La surface d'un cercle de 600 m de rayon est d'environ 1 km². Les paramètres du courant de foudre utilisés pour calculer ces courbes sont définis dans la CEI 61312-1 et reproduits dans les tableaux A.2, A.3 et A.4. Ici, la valeur maximale correspondant au niveau de protection II pour le premier arc en retour et pour l'arc en retour subséquent a été choisie pour permettre la comparaison avec un coup de foudre moyen.

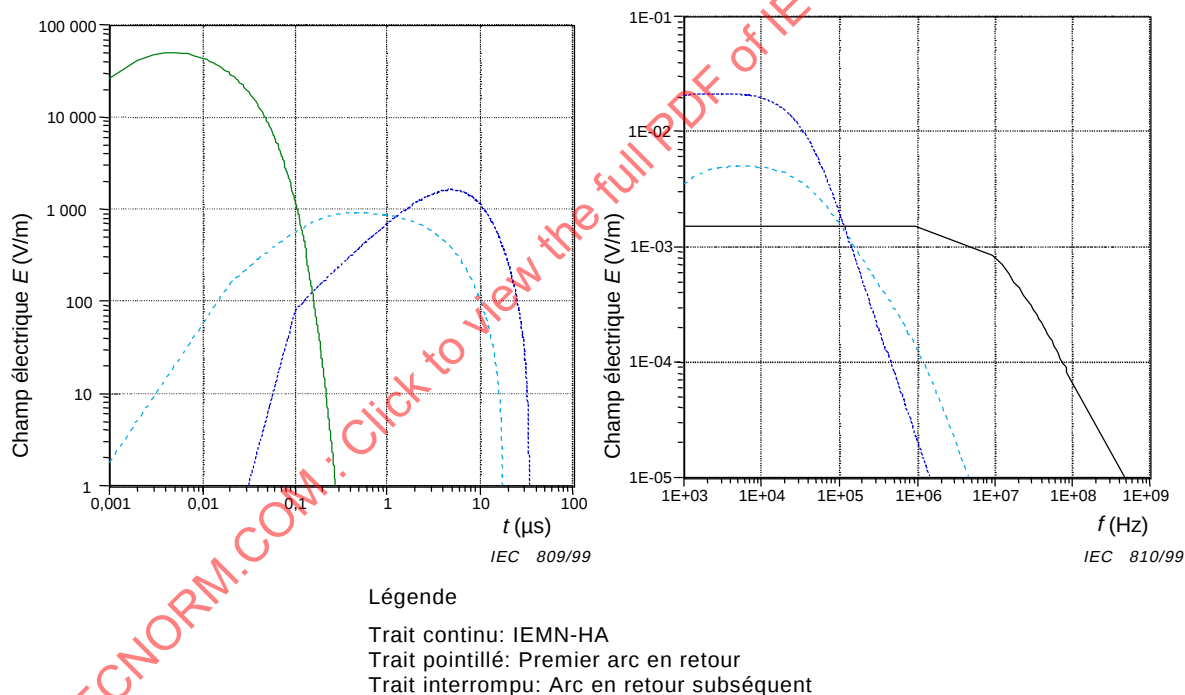


Figure A.2a – Représentation en fonction du temps

Figure A.2b – Représentation en fonction de la fréquence

Figure A.2 – Champs électriques de l'IEMN-HA initiale et de la foudre à une distance de 1 km dus à un courant de canal de 150 kA crête pour le premier arc en retour et de 37,5 kA pour l'arc en retour subséquent

A.2 Environnement conduit de l'IEMN-HA initiale et de la foudre

L'environnement IEMN-HA conduit a été défini en combinant la polarisation verticale et horizontale en fonction de l'angle d'inclinaison du point d'observation et la probabilité d'occurrence des angles azimutal et d'élévation. Cette méthode a permis d'obtenir une courbe type de courant de court-circuit définissant l'environnement conduit dans une ligne de 1 km de long et à 10 m au-dessus du sol en court-circuit à une extrémité. Les paramètres de cet

A comparison between the time behaviour and the frequency spectra of HEMP and lightning first and subsequent stroke electric field components is shown in figure A.2.

For HEMP, the frequency spectrum corresponds to the standard early-time electric field as shown above in figure. A.1. For lightning EMP (LEMP), the field intensity depends on the distance to the stroke location. A good compromise could be to choose a distance which is inside an area in which statistically at least one stroke per year could happen. For a keraunic level N_k , an empirical formula gives the following stroke density:

$$N_s = N_k/7 \quad 1/\text{km}^2/\text{year} \quad (\text{A.1})$$

For a keraunic value of 30, this gives about four strokes per square kilometre per year, which is a good compromise between the value of 80 to 100 in tropical regions and the value 10 in northern parts of the world. A circle with a radius of 600 m gives a surface of about 1 km². The lightning current parameters which have been used for the calculation of these curves are defined in IEC 61312-1 and reproduced in tables A.2, A.3 and A.4. In order to make a comparison with an average lightning stroke, the peak value corresponding to protection level II for both first and subsequent strokes has been chosen.

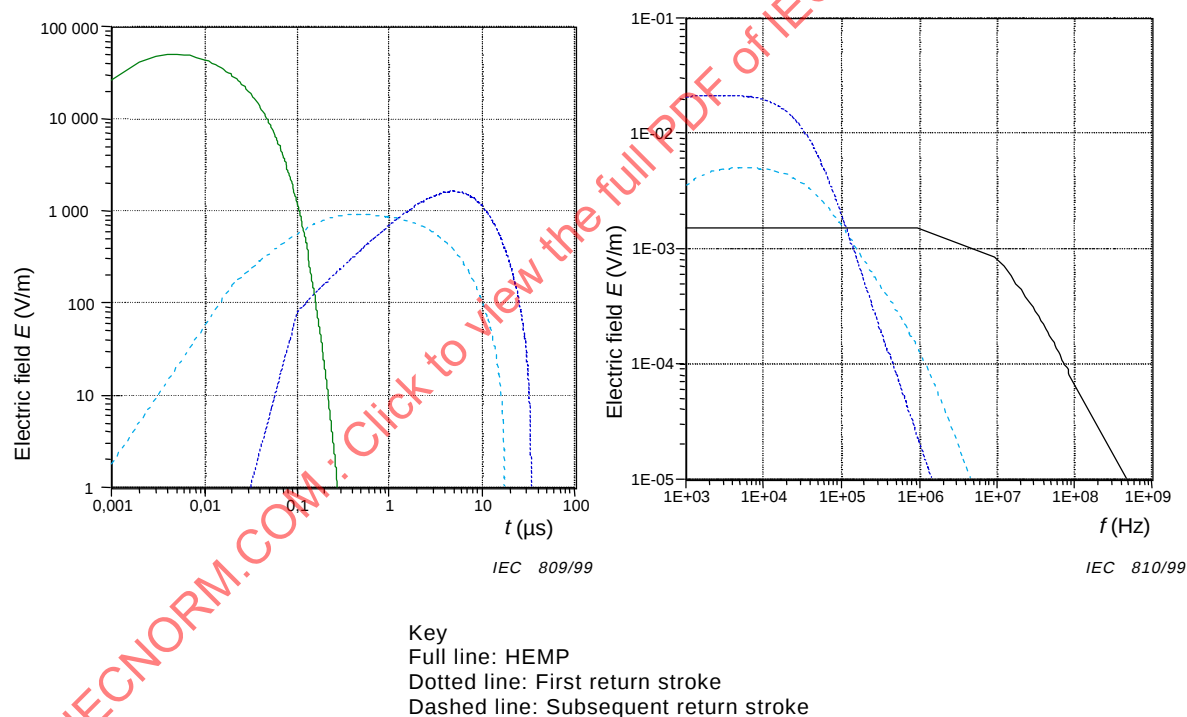


Figure A.2a – Time domain

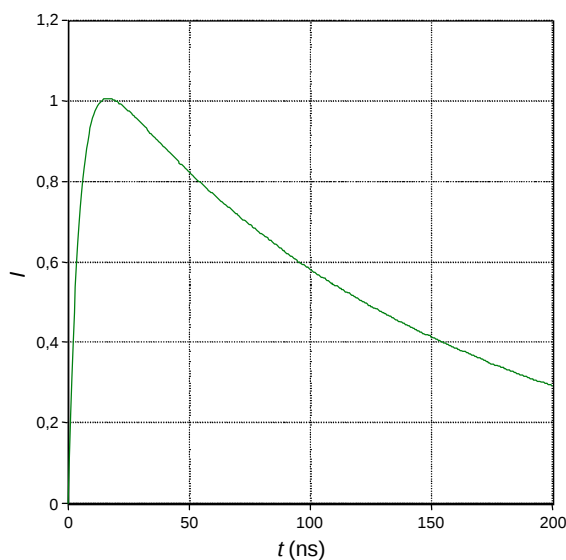
Figure A.2b – Frequency domain

Figure A.2 – Early-time HEMP and lightning electric fields at a distance of 1 km due to a channel-base current of 150 kA peak value for the first stroke and 37,5 kA for the subsequent stroke

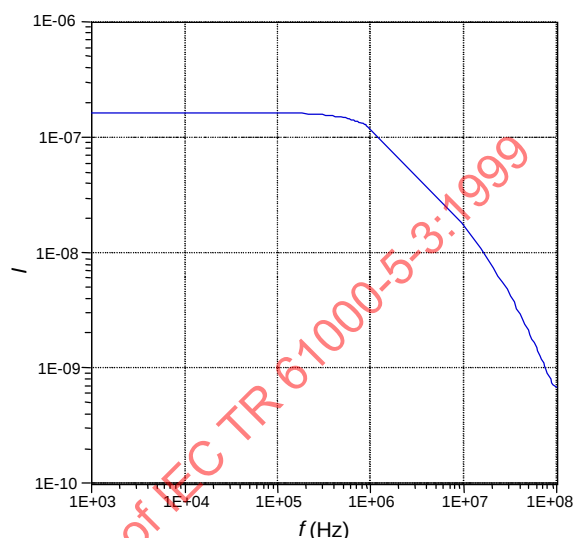
A.2 Early-time HEMP and lightning conducted environment

The HEMP conducted environment has been defined using an approach in which a combined horizontal and vertical polarization, as a function of the dip angle of the observation point, and the probability of occurrence of the elevation and azimuthal angles have been considered. This method has permitted the development of a typical short-circuit current curve which defines the conducted environment in a line of 1 km in length and at a height of 10 m, short-circuited at

environnement IEMN-HA conduit sont: temps de montée $t_r = 10$ ns et largeur d'impulsion $t_w = 100$ ns (à demi-amplitude). Les valeurs crêtes dépendent de la probabilité ou du risque d'occurrence et sont indiquées dans le tableau A.1. Les figures A.3a et A.3b représentent l'environnement conduit normalisé (à 1 A) en fonction du temps et de la fréquence, respectivement.



IEC 811/99



IEC 812/99

Figure A.3a – Représentation en fonction du temps

Figure A.3b – Représentation en fonction de la fréquence

Figure A.3 – Courant de court-circuit conduit d'une IEMN-HA initiale (normalisé à 1 A)

Tableau A.1 – Courants crêtes de court-circuit conduits d'une IEMN-HA initiale (mode commun) d'une ligne aérienne à 10 m au-dessus du sol

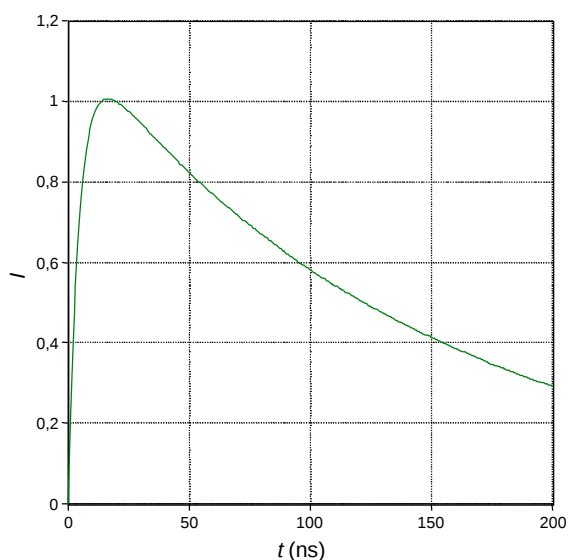
Sévérité %	Courant crête I_{pk} A		
	$L > 0,2$ km	$0,1 \leq L \leq 0,2$ km	$L < 0,1$ km
50	500	500	$5\,000 \times L$
90	1\,500	$7\,500 \times L$	$7\,500 \times L$
99	4\,000	$20\,000 \times L$	$20\,000 \times L$

NOTE – Forme d'onde: 10×100 ns; $Z_c = 400 \, \Omega$.

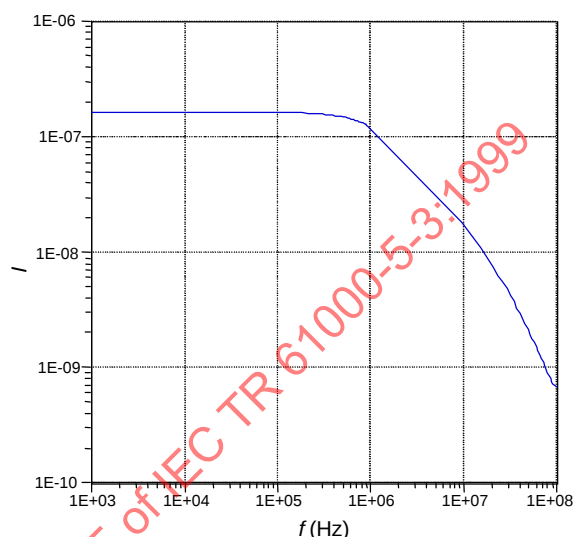
La CEI 61312-1 définit les paramètres ci-dessous du courant de foudre au niveau du sol à l'aide de mesures du courant de foudre effectuées pendant des années dans différentes parties du monde:

- un courant impulsionnel simulant le premier arc en retour de polarité positive ou négative (voir figure A.4a). Sa durée de front est de 10 μ s et sa durée jusqu'à mi-hauteur de 350 μ s (voir tableau A.2);
- un courant impulsionnel simulant l'arc en retour subséquent à polarité négative. Sa durée de front est de 0,25 μ s et sa durée jusqu'à mi-valeur de 100 μ s (voir figure A.4a et tableau A.3). Les paramètres du premier arc en retour et des arcs en retour subséquents, désignés collectivement par les termes «coup de courte durée» sont définis à la figure A.4a. Le comportement en fonction du temps et de la fréquence de ces deux sortes de courant est illustré par les figures A.5a et A.5b.

one end. The parameters of this HEMP conducted environment are: $t_r = 10$ ns for rise time and $t_w = 100$ ns for pulse width (at half-amplitude). The peak values are a function of the occurrence probability (or severity) and are shown in table A.1. The time and frequency domain representations of the normalized (to 1 A) conducted environment are shown in figures A.3a and A.3b, respectively.



IEC 811/99



IEC 812/99

Figure A.3a – Time-domain behaviour

Figure A.3b – Frequency-domain behaviour

Figure A.3 – Early-time HEMP conducted short-circuit current (normalized to 1 A)

Table A.1 – Early-time HEMP conducted short-circuit peak currents (common mode) for an overhead line (10 m above the ground)

Severity %	Peak current I_{pk} A		
	$L > 0,2$ km	$0,1 \leq L \leq 0,2$ km	$L < 0,1$ km
50	500	500	$5\,000 \times L$
90	1\,500	$7\,500 \times L$	$7\,500 \times L$
99	4\,000	$20\,000 \times L$	$20\,000 \times L$

NOTE – Waveform: 10×100 ns; $Z_c = 400 \, \Omega$.

Based on lightning current measurements performed over the years in different parts of the world, the lightning protection standard IEC 61312-1 has defined lightning current at ground level as:

- an impulse current simulating the first return stroke of positive or negative polarity (see figure A.4a). This current has a front time of $10 \, \mu\text{s}$ and a time to half-value of $350 \, \mu\text{s}$ (see table A.2);
- an impulse current simulating the subsequent stroke of negative polarity. This current has a front time of $0,25 \, \mu\text{s}$ and a time to half-value of $100 \, \mu\text{s}$ (see figure A.4a and table A.3). For the definition of the parameters of the first and subsequent return strokes, which together are denoted by the term “of short duration stroke”, see figure A.4a. The time and frequency behaviours of the two currents are represented in figures A.5a and A.5b.

Tableau A.2 – Paramètres du premier coup de foudre

Paramètres du courant	Niveau de protection		
	I	II	III-IV
Courant crête I (kA)	200	150	100
Durée de front T_1 (μs) ¹⁾	10	10	10
Durée jusqu'à mi-valeur T_2 (μs)	350	350	350
Charge d'un coup de courte durée Q_s ²⁾ (C)	100	75	50
Energie spécifique W/R ³⁾ (MJ/Ω)	10	5,6	2,5
¹⁾ La durée de front est définie à la figure A.4. ²⁾ Cela comprend la charge totale de tous les coups de courte durée, puisque la majeure partie de Q_s est contenue dans le premier coup. ³⁾ Cela comprend l'énergie spécifique totale de tous les coups, puisque la majeure partie de W/R est contenue dans le premier coup.			

Tableau A.3 – Paramètres du coup de foudre subséquent

Paramètres du courant	Niveau de protection		
	I	II	III-IV
Courant crête I (kA)	50	37,5	25
Durée de front T_1 (μs)	0,25	0,25	0,25
Durée jusqu'à mi-valeur T_2 (μs)	100	100	100
Raideur moyenne I/T_1 (kA/μs)	200	150	100

- un courant de longue durée simulant un courant continu (voir figure A.4b). Ce courant a une durée de 0,5 s.

Comme le montre la figure A.4a, la CEI 61312-1 définit une seule forme pour les deux coups de foudre de courte durée, mais trois amplitudes de courant différentes qui correspondent aux trois niveaux de protection (voir tableaux A.2, A.3 et A.4). Les niveaux de protection correspondent aux trois valeurs de l'efficacité du circuit de protection contre la foudre: 98 % pour le niveau I, 95 % pour le niveau II et 90 % pour les niveaux III-IV.

Tableau A.4 – Paramètres d'un coup de foudre de longue durée

Paramètres du courant (voir figure A.4b)	Niveau de protection		
	I	II	III-IV
Charge Q_1 (C)	200	150	100
Durée T (s)	0,5	0,5	0,5

Table A.2 – Lightning parameters of the first stroke

Current parameters	Protection level		
	I	II	III-IV
Peak current I (kA)	200	150	100
Front time T_1 (μs) ¹⁾	10	10	10
Time to half-value T_2 (μs)	350	350	350
Charge of short duration stroke Q_s ²⁾ (C)	100	75	50
Specific energy W/R ³⁾ (MJ/ Ω)	10	5,6	2,5
¹⁾ Front time is defined in figure A.4. ²⁾ This includes the total charge of all short duration strokes, since the substantial part of Q_s is contained in the first stroke. ³⁾ This includes the total specific energy of all strokes, since the substantial part of W/R is contained in the first stroke.			

Table A.3 – Lightning parameters of the subsequent stroke

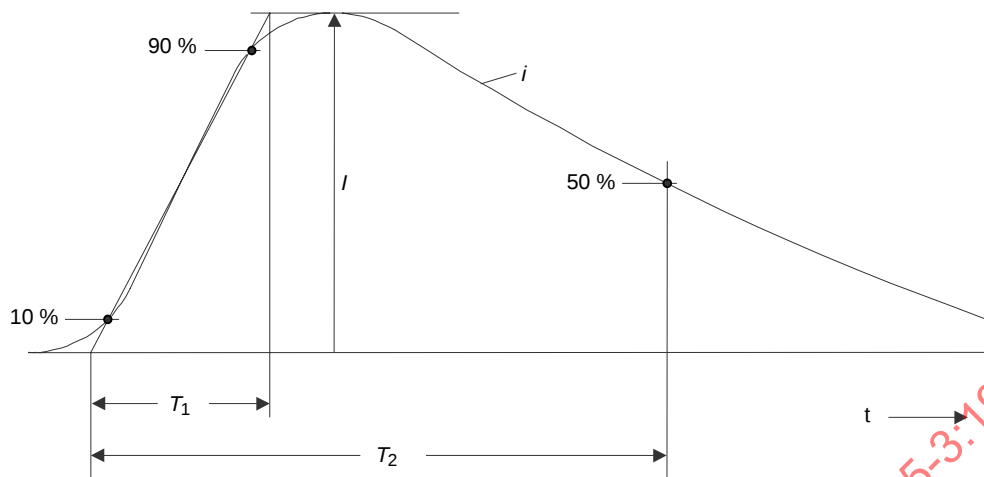
Current parameters	Protection level		
	I	II	III-IV
Peak current I (kA)	50	37,5	25
Front time T_1 (μs)	0,25	0,25	0,25
Time to half-value T_2 (μs)	100	100	100
Average steepness I/T_1 (kA/ μs)	200	150	100

- a long duration current simulating the continuing current (see figure A.4b). This current has a duration of 0,5 s.

As seen from figure A.4a, IEC 61312-1 defines a single shape for both short duration strokes, but three current amplitude values corresponding to three protection levels (see tables A.2, A.3 and A.4). The protection levels correspond to three efficiency values of the lightning protection system: 98 % for level I, 95 % for level II and 90 % for levels III-IV.

Table A.4 – Lightning parameters for long duration stroke

Current parameters (see figure A.4b)	Protection level		
	I	II	III-IV
Charge Q_1 (C)	200	150	100
Duration T (s)	0,5	0,5	0,5



IEC 813/99

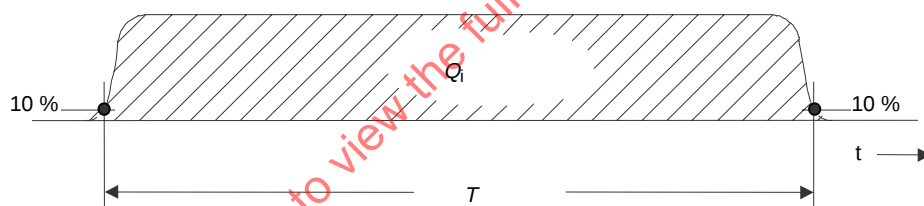
Légende

I : Courant crête

T_1 : Durée de front

T_2 : Durée jusqu'à mi-valeur

Figure A.4.a – Coup de foudre de courte durée



IEC 814/99

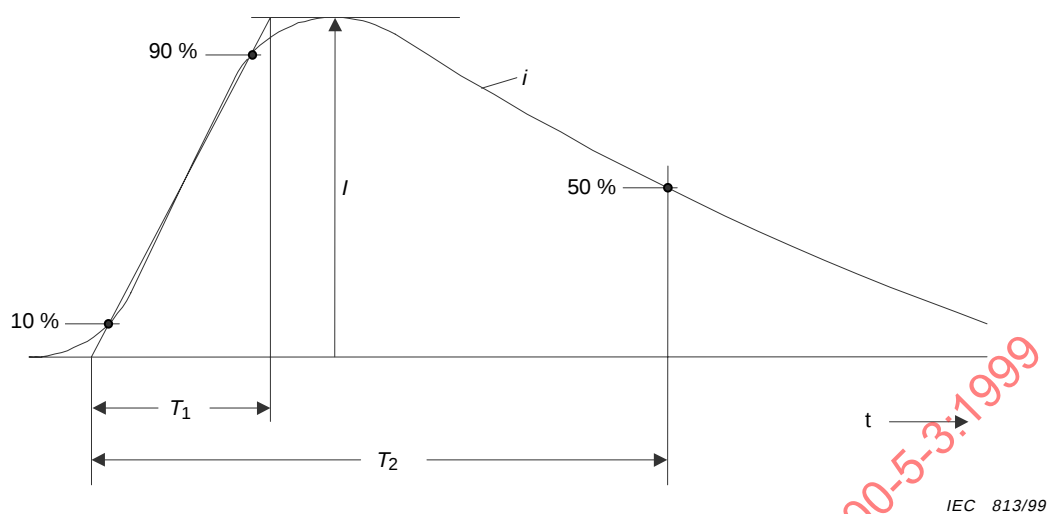
Légende

T : Durée (temps s'écoulant entre 10 % de la valeur du front et 10 % de la valeur de la queue)

Q_i : Charge d'un coup de longue durée

Figure A.4b – Coup de foudre de longue durée

Figure A.4 – Définition des paramètres des coups de foudre de courte et de longue durée



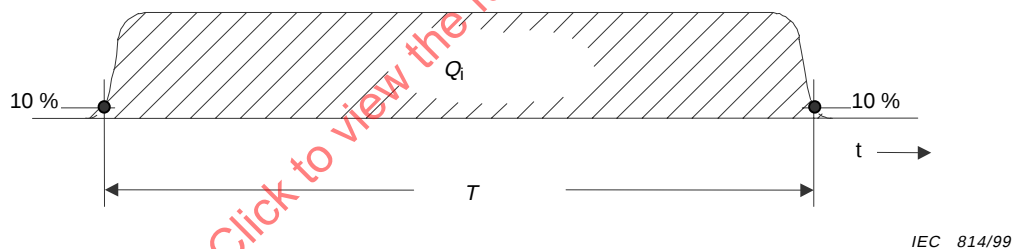
Key

I : Peak current

T_1 : Front time

T_2 : Time to half-value

Figure A.4a – Short-duration stroke



Key

T : Duration (time from 10 % value in the front to 10 % value in the tail)

Q_i : Charge of the long duration stroke

Figure A.4b – Long-duration stroke

Figure A.4 – Definition of parameters of the short- and long-duration strokes