

NORME
INTERNATIONALE

CEI
IEC

INTERNATIONAL
STANDARD

61000-2-10

Première édition
First edition
1998-11

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 2-10:

**Environnement – Description de l'environnement
IEMN-HA – Perturbations conduites**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 2-10:

**Environment – Description of
HEMP environment – Conducted disturbance**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61000-2-10:1998

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.

NORME
INTERNATIONALE

CEI
IEC

INTERNATIONAL
STANDARD

61000-2-10

Première édition
First edition
1998-11

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 2-10:

**Environnement – Description de l'environnement
IEMN-HA – Perturbations conduites**

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 2-10:

**Environment – Description of
HEMP environment – Conducted disturbance**

© IEC 1998 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives.....	8
3 Généralités	10
4 Définitions.....	12
5 Description de l'environnement IEMN-HA, paramètres conduits	18
5.1 Remarques introductives.....	18
5.2 Environnement externe conduit généré par l'IEMN-HA initiale.....	20
5.3 Environnement externe conduit généré par l'IEMN-HA intermédiaire.....	24
5.4 Environnement externe conduit généré par l'IEMN-HA finale.....	26
5.5 Courants antennaires	28
5.6 Environnements conduits internes dus à l'IEMN-HA.....	38
Annexe A (informative) Discussion du couplage de l'IEMN-HA initiale avec des lignes longues	42
Annexe B (informative) Discussion du couplage de l'IEMN-HA intermédiaire avec des lignes longues	48
Annexe C (informative) Réponses des antennes simples à l'environnement IEMN-HA initial défini par la CEI	52
Annexe D (informative) Mesures de courants couplés sur des câbles à l'intérieur de bâtiments abritant des centraux téléphoniques.....	84

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 2-10: Environnement – Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations conduites

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet 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 ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61000-2-10 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.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
77C/61/FDIS	77C/65/RVD

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –**Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment –
Conducted disturbance**

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 or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61000-2-10 has been prepared by subcommittee 77C: Immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP), of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

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

FDIS	Report on voting
77C/61/FDIS	77C/65/RVD

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

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

INTRODUCTION

La CEI 61000 est publiée sous la forme de plusieurs parties séparées conformément à la structure suivante:

Partie 1: Généralités

Considérations générales (introduction, principes fondamentaux)

Définitions, terminologie

Partie 2: Environnement

Description de l'environnement

Classification de l'environnement

Niveaux de compatibilité

Partie 3: Limites

Limites d'émission

Limites d'immunité (dans la mesure où 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

Guides d'installation

Méthodes et dispositifs d'atténuation

Partie 6: Normes génériques

Partie 9: Divers

Chaque partie est à son tour subdivisée en plusieurs parties publiées soit comme Normes internationales, soit comme rapports techniques, dont certaines ont déjà été publiées en tant que sections. D'autres seront publiées avec le numéro de la partie suivi d'un tiret et d'un second chiffre identifiant la subdivision.

INTRODUCTION

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

Part 1: General

General considerations (introduction, fundamental principles)

Definitions, terminology

Part 2: Environment

Description of the environment

Classification of the environment

Compatibility levels

Part 3: Limits

Emission limits

Immunity limits (insofar 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

Each part is further subdivided into several parts, published either as International Standards or technical reports, some of which have already been published as sections. Others will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision.

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 2-10: Environnement – Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations conduites

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale définit l'environnement IEMN-HA conduit (l'impulsion électromagnétique à haute altitude) consécutif à une explosion nucléaire à haute altitude.

Deux cas sont généralement étudiés:

- les explosions nucléaires à haute altitude;
- les explosions nucléaires à basse altitude.

Pour les systèmes civils, le cas le plus important est celui des explosions nucléaires à haute altitude. Dans ce cas, les autres effets de l'explosion nucléaire: souffle, onde de choc au sol, effet thermique et rayonnements ionisants nucléaires n'existent pas au niveau du sol.

Toutefois, l'impulsion électromagnétique associée à l'explosion peut perturber et endommager les systèmes de communication, les systèmes électroniques ainsi que le réseau électrique, mettant par là même en péril l'équilibre de la société moderne.

Le but de cette norme est d'établir une référence commune sur l'environnement IEMN-HA conduit permettant de définir des contraintes réalistes à appliquer aux équipements victimes afin d'évaluer leurs performances.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivant contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 61000. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 61000 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes Internationales en vigueur.

CEI 60050(161):1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

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

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance

1 Scope

This International Standard defines the high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) conducted environment that is one of the consequences of a high-altitude nuclear explosion.

Those dealing with this subject consider two cases:

- high-altitude nuclear explosions;
- low-altitude nuclear explosions.

For civil systems the most important case is the high-altitude nuclear explosion. In this case, the other effects of the nuclear explosion: blast, ground shock, thermal and nuclear ionizing radiation are not present at the ground level.

However, the electromagnetic pulse associated with the explosion may cause disruption of, and damage to, communication, electronic and electric power systems thereby upsetting the stability of modern society.

The object of this standard is to establish a common reference for the conducted HEMP environment in order to select realistic stresses to apply to victim equipment for evaluating their performance.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 61000. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 61000 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

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

IEC 61000-2-9:1996, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 1: Description of HEMP environment – Radiated disturbance* – Basic EMC publication

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

3 Généralités

Une explosion nucléaire à haute altitude (supérieure à 30 km) engendre trois types d'impulsions électromagnétiques que l'on peut observer à la surface de la terre:

- IEMN-HA initiale (rapide);
- IEMN-HA intermédiaire (moyenne);
- IEMN-HA finale (lente).

Dans le passé, on s'est surtout intéressé à l'impulsion IEMN-HA initiale appelée simplement alors IEMN-HA. Nous utiliserons ici indifféremment «IEM à haute altitude» ou «IEMN-HA» pour désigner les trois types d'impulsions. Le terme «IEMN» ¹⁾ désigne de nombreuses catégories d'impulsions électromagnétiques nucléaires, y compris celles qui sont produites par des explosions en surface (SREMP) ²⁾ ou sur des systèmes spatiaux (SGEMP) ³⁾.

L'impulsion IEMN-HA étant produite par une explosion à haute altitude, nous n'observons pas à la surface de la terre d'autres phénomènes propres à l'environnement nucléaire militaire tels que rayons gamma, dégagement de chaleur et ondes de choc. Des impulsions IEMN-HA ayant des incidences sur des équipements électroniques éloignés du lieu de l'explosion ont été signalées lors d'essais nucléaires américains à haute altitude dans le Pacifique Sud et en URSS au début des années 1960.

La présente norme décrit l'environnement conduit induit par l'IEMN-HA sur les câbles ou lignes d'énergie externes et internes aux installations et sur des antennes externes.

¹⁾ IEMN: Impulsion électromagnétique nucléaire.

²⁾ SREMP: Impulsion électromagnétique nucléaire de la région source.

³⁾ SGEMP: Impulsion électromagnétique nucléaire générée par le système.

3 General

A high-altitude (above 30 km) nuclear burst produces three types of electromagnetic pulses which are observed on the earth's surface:

- early-time HEMP (fast);
- intermediate-time HEMP (medium);
- late-time HEMP (slow).

Historically most interest has been focused on the early-time HEMP which was previously referred to as simply HEMP. Here we will use the term high-altitude EMP or HEMP to include all three types. The term NEMP ¹⁾ covers many categories of nuclear EMPs including those produced by surface bursts (SREMP) ²⁾ or created on space systems (SGEMP) ³⁾.

Because the HEMP is produced by a high-altitude detonation, we do not observe other nuclear weapon environments such as gamma rays, heat and shock waves at the earth's surface. HEMP was reported from high-altitude nuclear tests in the South Pacific by the US and over the USSR during the early 1960s, producing effects on electronic equipment far from the burst location.

This standard presents the conducted HEMP environment induced on metallic lines, such as cables or power lines, external and internal to installations, and external antennas.

¹⁾ NEMP: Nuclear electromagnetic pulse.

²⁾ SREMP: Source region EMP.

³⁾ SGEMP: System generated EMP.

4 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions données dans la CEI 60050(161) ainsi que les suivantes s'appliquent:

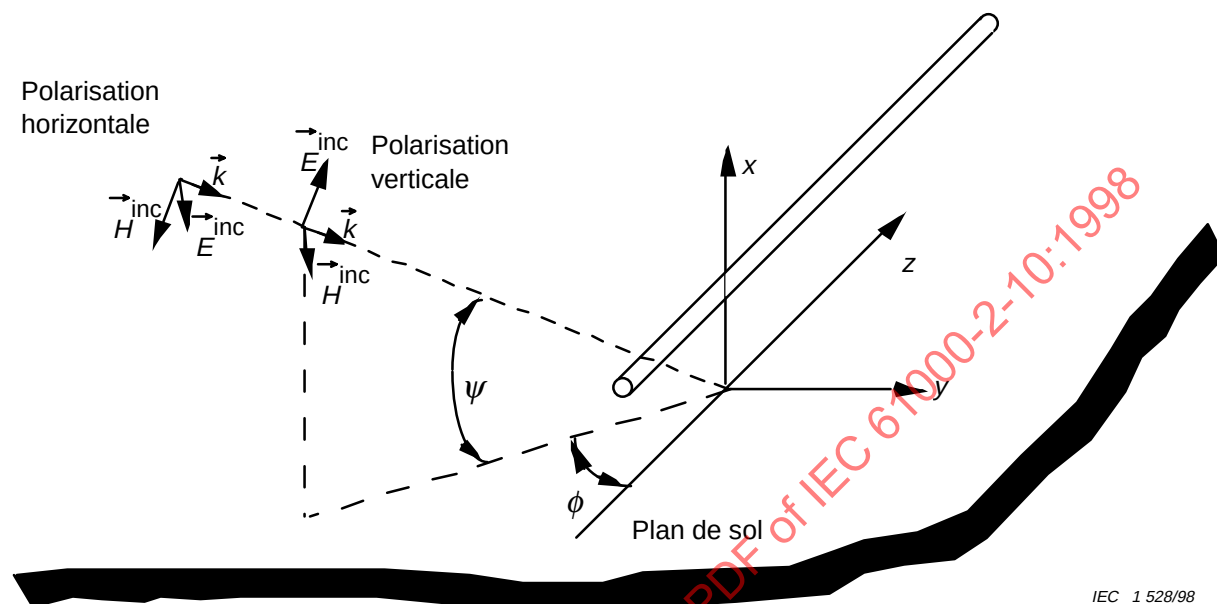


Figure 1 – Géométrie utilisée pour la définition de la polarisation et des angles de site ψ et d'azimut ϕ

4.1

angle de site dans le plan vertical (angle d'élévation), ψ

angle ψ mesuré dans le plan vertical, compris entre une surface horizontale plane telle que le sol et le vecteur de propagation (voir figure 1)

4.2

angle d'azimut, ϕ

angle compris entre la projection du vecteur de propagation sur le sol et l'axe principal de l'objet atteint (axe z pour la ligne de transmission de la figure 1)

4.3

onde composite

onde maximalisant les caractéristiques importantes d'un groupe d'ondes

4.4

couplage

interaction du champ IEMN-HA avec un système, produisant des courants et tensions à la surface du système et dans ses câbles. Les tensions sont produites par des charges induites. Elles ne sont définies qu'aux basses fréquences ayant des longueurs d'onde supérieures aux dimensions des surfaces ou aux longueurs d'entrefer

4 Definitions

For the purpose of this International Standard, the definitions given in IEC 60050(161) apply, as well as the following definitions:

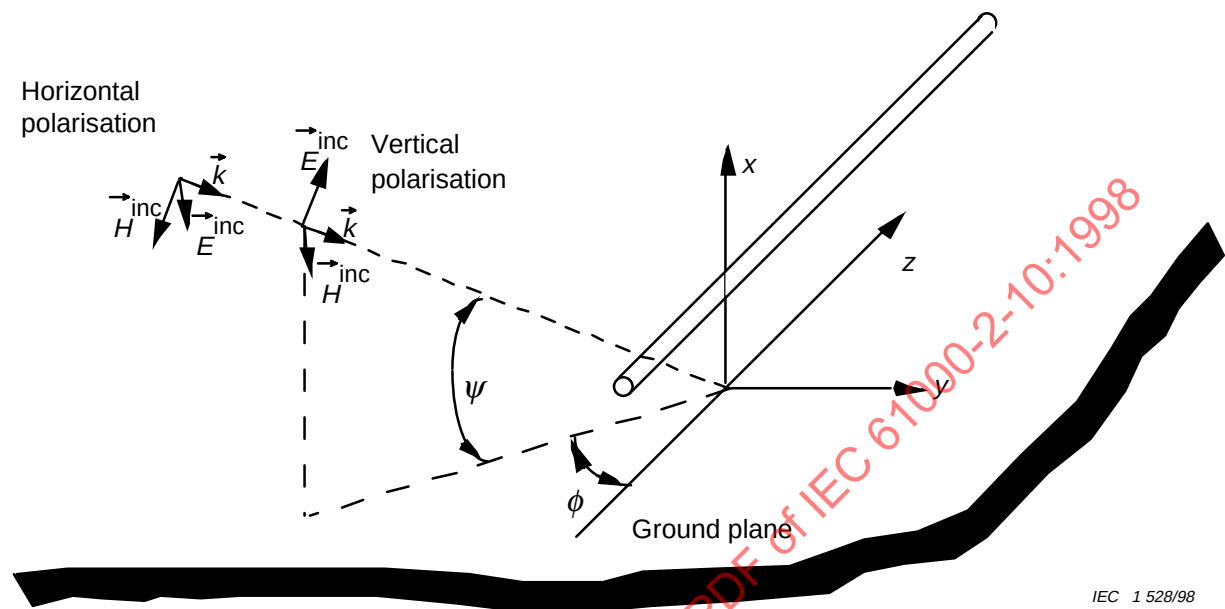


Figure 1 – Geometry for the definition of polarization and of the angles of elevation ψ and azimuth ϕ

4.1

angle of elevation in the vertical plane, ψ

angle ψ measured in the vertical plane between a flat horizontal surface such as the ground and the propagation vector (see figure 1)

4.2

azimuth angle, ϕ

angle between the projection of the propagation vector on the ground plane and the principal axis of the victim object (z axis for the transmission line of figure 1)

4.3

composite waveform

waveform which maximizes the important features of a waveform

4.4

coupling

interaction of the HEMP field with a system to produce currents and voltages on system surfaces and cables. Voltages result from the induced charges and are only defined at low frequencies with wavelengths larger than the surface or gap dimensions

4.5

sens de propagation des ondes électromagnétiques

sens du vecteur de propagation $\vec{k}$, perpendiculairement au plan contenant les vecteurs des champs électrique et magnétique (voir figure 2)

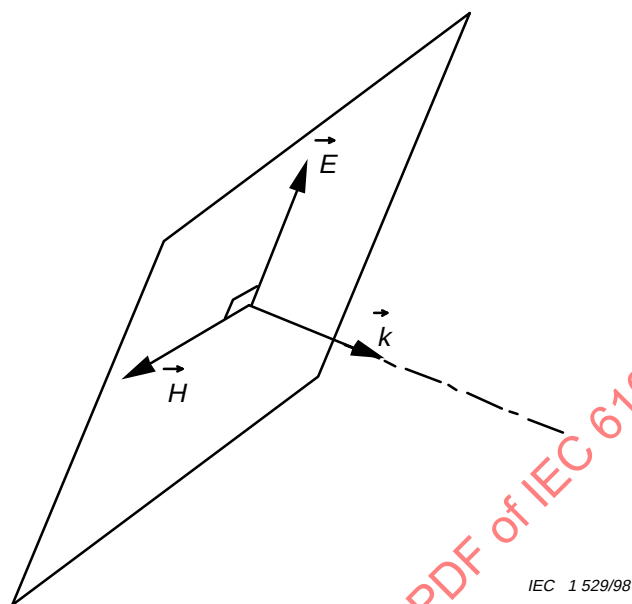


Figure 2 – Géométrie utilisée pour la définition de l'onde plane

4.6

E1, E2, E3

termes utilisés pour les champs électriques des ondes IEMN-HA initiale, intermédiaire et finale

4.7

IEM

toute impulsion électromagnétique, description générale

4.8

angle d'inclinaison géomagnétique, θ_{dip}

angle d'inclinaison formé par le vecteur d'induction géomagnétique $\vec{B}_e$ mesuré par rapport à l'horizontale locale dans le plan magnétique nord/sud. $\theta_{\text{dip}} = 90^\circ$ au pôle nord magnétique et -90° au pôle sud magnétique (voir figure 3)

4.5**direction of propagation of the electromagnetic wave**

direction of the propagation vector $\vec{k}$, perpendicular to the plane containing the vectors of the electric and the magnetic fields (see figure 2)

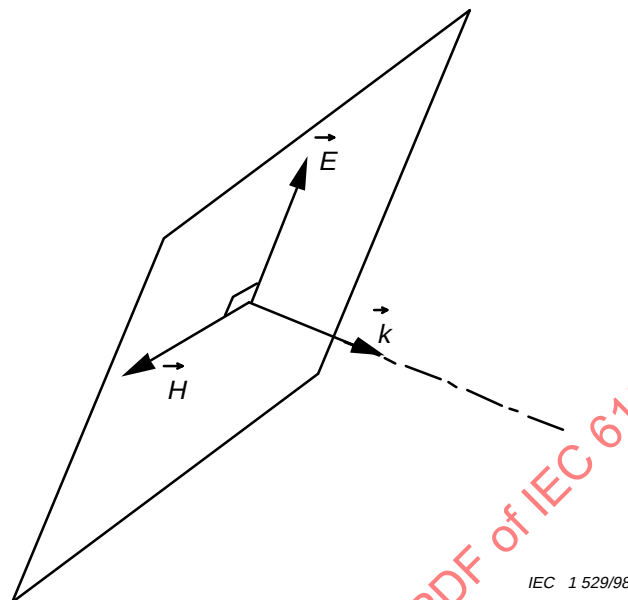


Figure 2 – Geometry for the definition of the plane wave

4.6**E1, E2, E3**

terminology for the early, intermediate and late-time HEMP electric fields

4.7**EMP**

any electromagnetic pulse, general description

4.8**geomagnetic dip angle, θ_{dip}**

dip angle of the geomagnetic flux density vector $\vec{B}_e$, measured from the local horizontal in the magnetic north-south plane. $\theta_{\text{dip}} = 90^\circ$ at the magnetic north pole, -90° at the magnetic south pole, (see figure 3)

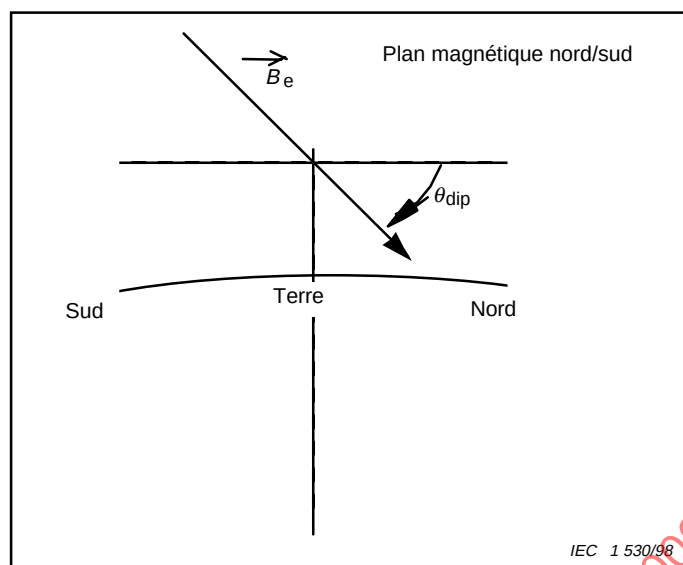


Figure 3 – Angle d'inclinaison géomagnétique

4.9

IEMN-HA

impulsion électromagnétique nucléaire haute altitude

4.10

haute altitude (explosion nucléaire)

altitude d'explosion supérieure à 30 km

4.11

polarisation horizontale

une onde électromagnétique est polarisée horizontalement lorsque le vecteur du champ magnétique se trouve dans le plan d'incidence et le vecteur du champ électrique perpendiculaire au plan d'incidence, et donc parallèle au plan du sol (voir figure 1). (Ce type de polarisation est également appelé polarisation électrique perpendiculaire ou transverse électrique (TE).)

4.12

plan d'incidence

plan formé par le vecteur de propagation et la normale au plan du sol

4.13

basse altitude (explosion nucléaire)

altitude d'explosion inférieure à 1 km

4.14

IEMN

impulsion électromagnétique (IEM) nucléaire; tout type d'onde IEM provoqué par une explosion nucléaire

4.15

point d'entrée (PdE)

point (localisation physique) d'une barrière électromagnétique, où l'énergie électromagnétique peut entrer ou sortir d'un volume topologique, à moins qu'un dispositif de protection adéquate du PdE ne soit mis en place. Un PdE ne se limite pas à un point géométrique. Les PdE sont classés en PdE de type ouverture ou PdE de type conduit selon le mode de pénétration. Ils sont aussi classés en PdE architecturaux, mécaniques, structurels ou électriques selon la fonction qu'ils desservent

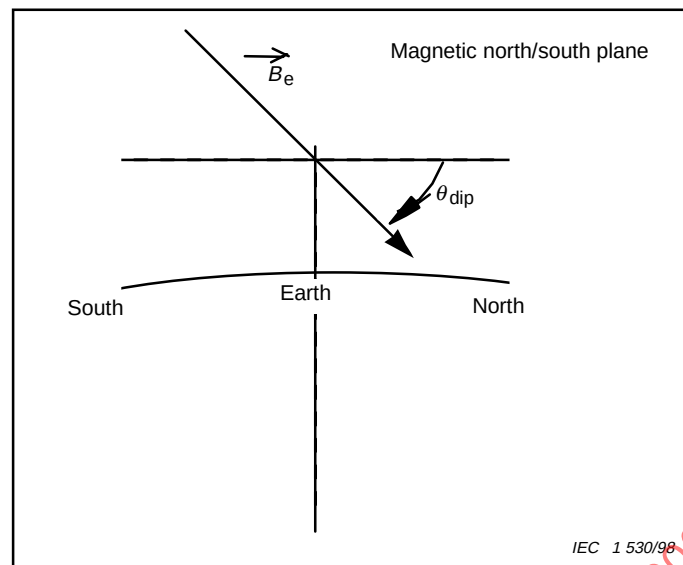


Figure 3 – Geomagnetic dip angle

4.9**HEMP**

high-altitude nuclear EMP

4.10**high-altitude (nuclear explosion)**

height of burst above 30 km altitude

4.11**horizontal polarization**

an electromagnetic wave is horizontally polarized if the magnetic field vector is in the incidence plane and the electric field vector is perpendicular to the incidence plane and thus parallel to the ground plane (see figure 1). (This type of polarization is also called perpendicular or transverse electric (TE).)

4.12**incidence plane**

plane formed by the propagation vector and the normal to the ground plane

4.13**low-altitude (nuclear explosion)**

height of burst below 1 km altitude

4.14**NEMP**

nuclear EMP; all types of EMP produced by a nuclear explosion

4.15**point-of-entry (PoE)**

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

4.16

largeur d'impulsion

sauf définition contraire, il s'agit de l'intervalle de temps entre les points du front montant et du front descendant d'une impulsion pour lesquels la valeur instantanée de l'amplitude est égale à 50 % de l'amplitude crête

4.17

impulsion rectifiée (IR)

intégrale de la valeur absolue de l'amplitude d'une forme d'onde temporelle sur un intervalle de temps spécifié

4.18

temps de montée (d'une impulsion)

sauf définition contraire, il s'agit de l'intervalle de temps entre le moment où l'amplitude instantanée d'une impulsion atteint pour la première fois une valeur basse et une valeur haute préalablement spécifiées, habituellement 10 % et 90 % de l'amplitude crête de l'impulsion

4.19

courant de court-circuit

valeur du courant lorsque les bornes de sortie d'un circuit sont mises en court-circuit. Il est généralement intéressant de connaître ce courant lorsque l'on teste les performances des dispositifs de protection contre les impulsions

4.20

impédance de source

impédance présentée par une source d'énergie aux bornes d'entrée d'un équipement ou d'un réseau

4.21

polarisation verticale

une onde électromagnétique est polarisée verticalement lorsque le vecteur du champ électrique se trouve dans le plan d'incidence et le vecteur du champ magnétique perpendiculaire au plan d'incidence, et donc parallèle au plan du sol (voir figure 1). (Ce type de polarisation est également appelé polarisation magnétique parallèle ou transverse magnétique (TM).)

5 Description de l'environnement IEMN-HA, paramètres conduits

5.1 Remarques introductives

Le champ électromagnétique généré par une explosion nucléaire à haute altitude tel que décrit dans la CEI 61000-2-9 induit des tensions et des courants dans toutes les structures métalliques. Ces courants et ces tensions qui se propagent dans des conducteurs constituent l'environnement conduit. L'environnement conduit est donc un phénomène secondaire qui découle du seul champ rayonné.

Toutes les structures métalliques (câbles, conducteurs, tuyaux, canalisations, fils, etc.) seront affectées par l'IEMN-HA. L'environnement conduit est important parce qu'il peut amener l'énergie de l'IEMN-HA sur les électroniques sensibles par l'intermédiaire des interconnexions: signaux, énergie et masse. Il existe deux catégories de conducteurs: les conducteurs externes et les conducteurs internes (d'un immeuble et à toute autre enceinte). Bien qu'elle puisse paraître simpliste, cette distinction est primordiale en ce qui concerne les informations fournies dans la suite de cette norme.

4.16**pulse width**

the time interval between the points on the leading and trailing edges of a pulse at which the instantaneous value is 50 % of the peak pulse amplitude, unless otherwise stated

4.17**rectified impulse (RI)**

the integral of the absolute value of a time waveform's amplitude over a specified time interval

4.18**rise time (pulse)**

the time interval between the instants in which the instantaneous amplitude of a pulse first reaches specified lower and upper limits, namely 10 % and 90 % of the peak pulse amplitude, unless otherwise stated

4.19**short-circuit current**

the value of current that flows when the output terminals of a circuit are shorted. This current is normally of interest when checking the performance of surge protection devices

4.20**source impedance**

the impedance presented by a source of energy to the input terminals of a device or network

4.21**vertical polarization**

an electromagnetic wave is vertically polarized if the electric field vector is in the incidence plane, and the magnetic field vector is perpendicular to the incidence plane and thus parallel to the ground plane (see figure 1). (This type of polarization is also called parallel or transverse magnetic (TM).)

5 Description of HEMP environment, conducted parameters**5.1 Introductory remarks**

The electromagnetic field generated by a high-altitude nuclear explosion described in IEC 61000-2-9 can induce currents and voltages in all metallic structures. These currents and voltages propagating in conductors represent the conducted environment. This means that the conducted environment is a secondary phenomenon, a consequence of the radiated field alone.

All metallic structures (i.e. wires, conductors, pipes, ducts, etc.) will be affected by the HEMP. The conducted environment is important because it can direct the HEMP energy to sensitive electronics through signal, power, and grounding connections. It should be noted that there are two distinct categories of conductors: external and internal conductors (with regard to a building or any other enclosure). While this may seem simplistic, this separation is critical in terms of the information to be provided in this standard.

La topologie électromagnétique permet d'expliquer les différences entre ces deux types de conducteurs. En général, les conducteurs externes sont situés à l'extérieur d'un bâtiment et sont soumis complètement à l'environnement IEMN-HA total. Cette catégorie inclut les câbles d'alimentation, les lignes métalliques de communication, les câbles d'antennes ainsi que les tuyaux d'eau ou de gaz (s'ils sont métalliques). Dans cette norme, les conducteurs peuvent être aériens (à une certaine distance du sol) ou enterrés. Les conducteurs internes sont situés dans un bâtiment partiellement ou entièrement blindé, qui a réduit les champs électromagnétiques dus à l'IEMN-HA. C'est une situation beaucoup plus complexe. En effet, les formes d'onde du champ dû à l'IEMN-HA seront significativement modifiées par le blindage du bâtiment. Ainsi, le couplage aux fils et câbles internes est très difficile à calculer bien que certains résultats d'essais de simulation de l'IEMN-HA soient utilisables.

Dans cette norme, les environnements conduits en mode commun sur les conducteurs externes sont calculés en utilisant des géométries simplifiées pour ces conducteurs et les environnements IEMN-HA spécifiés pour les formes d'ondes initiale, intermédiaire et finale. Les environnements externes conduits sont destinés à évaluer la performance des dispositifs de protection à l'extérieur d'un bâtiment; à cause des variations dans les systèmes d'alimentation, les effets des transformateurs et des répartiteurs téléphoniques ne sont pas pris en considération ici. Cette méthode permet d'obtenir des formes d'onde approximatives mais bien définies qui sont susceptibles d'être utilisées pour tester de manière normative des éléments de protection sur des conducteurs externes. En ce qui concerne les conducteurs internes, une procédure permettant d'estimer les environnements conduits appropriés aux tests sur les équipements est définie. Pour les câbles multifilaires non blindés, les courants circulaires des lignes vers le sol sont supposés égaux au courant de mode commun.

5.2 Environnement externe conduit généré par l'IEMN-HA initiale

Le champ électrique intense de l'IEMN-HA initiale se couple de manière efficace avec les antennes ainsi qu'avec toutes les lignes exposées telles les lignes téléphoniques et les lignes de transport d'énergie. Le mécanisme de couplage à une antenne est extrêmement variable et dépend fortement des paramètres de l'antenne. Dans de nombreux cas, il est recommandé d'effectuer des tests en onde entretenue (CW) sur une antenne et de combiner la fonction de réponse de l'antenne avec l'environnement IEMN-HA incident. Toutefois, le paragraphe 5.5 contient des équations simples qui permettent de calculer la réponse d'antennes minces. Pour les lignes longues, il est possible d'effectuer une série complète de calculs en mode commun qui sont fiables et dépendent seulement de quelques paramètres. Ces paramètres comprennent la longueur du conducteur, la situation (au-dessus du sol ou enterré) et la conductivité du sol en surface (épaisseur comprise entre 0 m et 5 m). En outre, le couplage de l'IEMN-HA dépendant de l'angle de site et de la polarisation (voir figure 1), il est possible d'évaluer statistiquement la probabilité d'obtenir un niveau de courant donné.

Le tableau 1 ci-dessous décrit les courants de court-circuit en mode commun (valeurs calculées) et les impédances de source du modèle de Thévenin équivalent (utilisées pour calculer les tensions de circuit ouvert), en fonction du niveau de sévérité, de la position et de la longueur du conducteur ainsi que de la conductivité du sol. Ces résultats conviennent pour calculer les courants de mode commun circulant sur des fils nus, sur des câbles aériens isolés et sur les blindages des câbles blindés ou des coaxiaux. Pour les câbles blindés, il convient d'utiliser l'impédance de transfert mesurée ou spécifiée afin de déterminer les courants et les tensions sur les fils internes. Bien que la forme d'onde varie en fonction de l'orientation, une seule forme d'onde est spécifiée pour les lignes aériennes. L'onde est définie par son temps de montée (10 % à 90 %) et sa durée à mi-hauteur; lorsque le temps de montée et la durée à mi-hauteur d'une impulsion sont décrits ensemble, la notation suivante $\Delta t_r / \Delta t_{pw}$ est généralement employée.

The difference between these two types of conductors is explained by electromagnetic topology. In general, external conductors are those which are located outside of a building and are completely exposed to the full HEMP environment. This category includes power, metallic communication lines, antenna cables, and water and gas pipes (if metallic). For the purposes of this standard the conductors can be elevated above the ground or buried in the earth. Internal conductors are those which are located in a partially or completely shielded building where the HEMP fields have been reduced by the building. This is a much more complex situation, because the HEMP field waveforms will be significantly altered by the building shield, and the coupling to internal wires and cables is consequently very difficult to calculate, although some measured data are available from simulated HEMP tests.

In this standard the external conducted common mode environments are calculated using simplified conductor geometries and the specified HEMP environments for the early, intermediate, and late-time waveforms. These conducted external environments are intended to be used to evaluate the performance of protection devices outside of a building, and because of variations in telecom and power systems, the effects of transformers and telephone splice boxes are not considered here. This process results in approximate, but well-defined waveforms that are needed to test protective elements on external conductors in a standardized manner. For the internal conductors, a procedure is defined to estimate the conducted environments appropriate for equipment testing. For unshielded multiconductor wires, it is assumed that the line-to-ground currents are equal to the common-mode current.

5.2 Early-time HEMP external conducted environment

For the early-time HEMP, the high-amplitude electric field couples efficiently to antennas and to any exposed lines such as power and telephone lines. The antenna coupling mechanism is extremely variable and dependent on the details of the antenna design. In many cases, it is advisable to perform continuous wave (CW) testing of an antenna and to "combine" the response function of the antenna with the incident HEMP environment using a convolution technique. We have, however, provided simple equations to compute the response of thin antennas (see 5.5). For long lines, it is possible to perform a comprehensive set of common mode calculations that are reliable and depend only upon a few parameters. These parameters include conductor length, exposure situation (above ground or buried), and the surface ground conductivity (for depths between 0 m and 5 m). In addition, because the HEMP coupling is dependent on angle of elevation and polarization (see figure 1), it is possible to statistically examine the probability of producing particular levels of current.

Table 1 below describes the calculated, coupled, common-mode short-circuit currents and the Thévenin equivalent source impedances (used to determine the open-circuit voltages) as functions of severity level, length of conductor, and ground conductivity. These results are appropriate for the common-mode currents flowing on bare wires, overhead insulated wires, and the shields of shielded cables or coaxial transmission lines. For shielded cables one should use measured or specified cable transfer impedances to determine internal wire currents and voltages. Although some waveform variation occurs for different exposure geometries, a single time waveform is specified for elevated lines. The waveform is defined in terms of the rise time (10 % to 90 %) and the pulse width (at half maximum); when the pulse characteristics of rise time and pulse width are described together, the usual description is $\Delta t_r / \Delta t_{pw}$.

Dans le tableau 1, un niveau de sévérité de 99 % indique que 99 % des courants induits seront inférieurs à ce niveau. Les courants calculés sur les lignes enterrées varient beaucoup moins avec l'angle d'incidence et dénotent une très large distribution de probabilité (peu de différences entre les niveaux de sévérité de 10 % et 90 %), c'est pourquoi ils ne sont pas décrits en termes de niveaux de sévérité; les variations sont définies par rapport à la conductivité du sol. Les courants sur les conducteurs aériens décrits dans le tableau 1 sont valables pour des hauteurs supérieures à 5 m et les courants sur les conducteurs enterrés le sont pour des conducteurs légèrement ($h < 30$ cm) au-dessus ou au-dessous du sol. Pour des hauteurs de conducteurs inférieures à 5 m, les valeurs obtenues pour les câbles aériens dans le tableau 1 peuvent être interpolées linéairement (entre 0,3 m et 5 m). Dans le cas où des lignes aériennes pénètrent dans le sol (transition par aérosouterrain), les courants ressembleront d'abord à ceux de la forme d'onde 1 puis décroîtront en fonction de la longueur de la partie enterrée jusqu'à atteindre la forme d'onde 2 (cela demande environ 20 m). Pour plus d'informations sur l'obtention de ces formes d'onde, voir l'annexe A.

Tableau 1 – Courants de court-circuit en mode commun générés par l'IEMN-HA initiale, la valeur crête I_{pk} et la forme temporelle étant fonction du niveau de sévérité de la longueur L en mètres et de la conductivité du sol σ_g

Tableau 1a – Conducteur aérien

Sévérité (%) ¹⁾	I_{pk} A		
	$L > 200$ m	$100 \leq L \leq 200$ m	$L < 100$ m
50	500	500	$5,0 \times L$
90	1 500	$7,5 \times L$	$7,5 \times L$
99	4 000	$20 \times L$	$20 \times L$
¹⁾ Pourcentage de courants dont la valeur est inférieure à la valeur indiquée. Forme d'onde 1: 10/100 ns. Impédance de source: $Z_s = 400 \Omega$.			

Tableau 1b – Conducteur enterré

σ_g S/m	I_{pk} A
	Toutes longueurs > 10 m
10^{-2}	200
10^{-3}	300
10^{-4}	400
Forme d'onde 2: 25/500 ns. Impédance de source: $Z_s = 50 \Omega$.	

In table 1 a severity level of 99 % indicates that 99 % of the currents produced will be less than this value. The buried line currents calculated vary much less with angle of incidence and indicate a very broad probability distribution (small differences between 10 % and 90 % severity) and therefore are not described in terms of severity levels; variations are shown for ground conductivity. In terms of applicability for table 1, the elevated conductor currents are accurate for heights above 5 m while the buried currents can be used for conductors slightly ($h < 30$ cm) above the surface and below the surface. For conductor heights below 5 m, the values in table 1 may be linearly interpolated (between 0,3 m and 5 m). For cases where the lines from an elevated geometry enter the ground in an insulated manner, the currents will initially resemble waveform 1, decreasing as a function of burial distance until waveform 2 is reached (requires approximately 20 m). Consult annex A for further information regarding the derivation of these waveforms.

Table 1 – Early-time HEMP conducted common-mode short-circuit currents including the time history and peak value I_{pk} as a function of severity level, length L in metres and ground conductivity σ_g

Table 1a – Elevated conductor

Severity (%) ¹⁾	I_{pk} A		
	$L > 200$ m	$100 \leq L \leq 200$ m	$L < 100$ m
50	500	500	$5,0 \times L$
90	1 500	$7,5 \times L$	$7,5 \times L$
99	4 000	$20 \times L$	$20 \times L$
¹⁾ Percentage of currents smaller than the indicated value. Waveform 1: 10/100 ns. Source impedance: $Z_s = 400 \Omega$.			

Table 1b – Buried conductor

σ_g S/m	I_{pk} A
	All lengths > 10 m
10^{-2}	200
10^{-3}	300
10^{-4}	400
Waveform 2: 25/500 ns. Source impedance: $Z_s = 50 \Omega$.	

5.3 Environnement externe généré par l'IEMN-HA intermédiaire

L'IEMN-HA intermédiaire ne se couple efficacement que sur les conducteurs d'une longueur supérieure à 1 km. C'est pourquoi elle n'est à prendre en compte que sur les conducteurs externes tels que les lignes de transport d'énergie ou les lignes de télécommunication. La largeur de l'impulsion de l'IEMN-HA intermédiaire étant beaucoup plus importante que celle de l'IEMN-HA initiale, le couplage de cette onde varie moins en fonction de l'angle de site. Cela signifie que la variation statistique est moins importante que dans le cas du couplage avec l'onde initiale. Par contre, la conductivité du sol est plus importante et affecte le couplage sur les lignes aériennes aussi bien que sur les lignes enterrées. Voir annexe B pour plus d'informations.

Le tableau 2 décrit l'environnement externe conduit en fonction du type de ligne, de la conductivité du sol (à des profondeurs de 1 km) et de la longueur de la ligne.

Tableau 2 – Courants de court-circuit (mode commun) induits par l'IEMN-HA intermédiaire, la valeur crête I_{pk} et la forme temporelle étant fonction de la longueur L en m et de la conductivité du sol σ_g

Tableau 2a – Conducteur aérien

σ_g S/m	I_{pk} A			
	$L > 10\,000\text{ m}$	$1\,000 \leq L \leq 10\,000\text{ m}$	$100 \leq L \leq 1\,000\text{ m}$	$L < 100\text{ m}$
10^{-2}	150	75	$0,05 \times L$	0
10^{-3}	350	200	$0,15 \times L$	0
10^{-4}	800	600	$0,45 \times L$	0
Forme d'onde 3: 25/1 500 μs . Impédance de source: $Z_s = 400\ \Omega$.				

Tableau 2b – Conducteur enterré

σ_g S/m	I_{pk} A		
	$L > 1\,000\text{ m}$	$100 \leq L \leq 1\,000\text{ m}$	$L < 100\text{ m}$
10^{-2}	50	$0,05 \times L$	0
10^{-3}	150	$0,15 \times L$	0
10^{-4}	450	$0,45 \times L$	0
Forme d'onde 3: 25/1 500 μs . Impédance de source: $Z_s = 50\ \Omega$.			

5.3 Intermediate-time HEMP external conducted environment

The intermediate-time HEMP environment only couples efficiently to long conductors in excess of 1 km. It is therefore of interest primarily for external conductors such as power and communication lines. Because the pulse width of this environment is much wider than that of the early-time environment, the coupling varies less as a function of angle of elevation. This means that the statistical variation is less important than in the case of the early-time coupling. On the other hand, the ground conductivity is more important here affecting the coupling to elevated lines in addition to buried lines. See annex B for a more detailed discussion.

Table 2 describes the conducted external environment as a function of line length and ground conductivity (to depths of 1 km).

Table 2 – Intermediate-time HEMP conducted common-mode short-circuit currents including the time history and peak value I_{pk} as a function of length L in metres and ground conductivity σ_g

Table 2a – Elevated conductor

σ_g S/m	I_{pk} A			
	$L > 10\,000\text{ m}$	$1\,000 \leq L \leq 10\,000\text{ m}$	$100 \leq L \leq 1\,000\text{ m}$	$L < 100\text{ m}$
10^{-2}	150	75	$0,05 \times L$	0
10^{-3}	350	200	$0,15 \times L$	0
10^{-4}	800	600	$0,45 \times L$	0
Waveform 3: 25/1 500 μ s. Source impedance: $Z_s = 400\ \Omega$.				

Table 2b – Buried conductor

σ_g S/m	I_{pk} A		
	$L > 1\,000\text{ m}$	$100 \leq L \leq 1\,000\text{ m}$	$L < 100\text{ m}$
10^{-2}	50	$0,05 \times L$	0
10^{-3}	150	$0,15 \times L$	0
10^{-4}	450	$0,45 \times L$	0
Waveform 3: 25/1 500 μ s. Source impedance: $Z_s = 50\ \Omega$.			

5.4 Environnement externe conduit généré par l'IEMN-HA finale

De même, le couplage de l'IEMN-HA finale n'est important que sur des conducteurs longs externes tels les lignes de transport d'énergie ou les lignes de télécommunication. Dans ce cas, toutefois, le calcul des courants de court-circuit, pour des configurations typiques, n'est pas facile, car l'IEMN-HA finale est décrite par une source de tension générée dans la terre. Or, cette source de tension provoque des courants seulement dans les conducteurs reliés à la terre en deux points ou plus. Puisque le courant qui circule est fortement dépendant de l'impédance du circuit, une méthode analytique qui permet de développer un environnement conduit normatif est proposée ci-après.

La méthode à utiliser est illustrée par un exemple. Sur la figure 4a, une configuration triphasée étoile/triangle est représentée ainsi que son circuit équivalent à la figure 4b. (E_0 est en valeur crête de l'IEMN-HA finale). Les plus hautes fréquences contenues dans l'environnement IEMN-HA finale étant de l'ordre de 1 Hz, il est tout à fait justifié de considérer le problème comme un problème en courant quasi continu dans lequel la source de tension est calculée directement à partir de l'environnement IEMN-HA final. Il peut être par conséquent admis que la source de tension V_s a la même dépendance temporelle que E_0 . Etant donné que les résistances de la ligne 4b (la résistance d'enroulement R_y et la résistance de mise à la masse R_f) ne dépendent pas de la fréquence pour $f < 1$ Hz, le courant induit I_{pk} aura la même dépendance temporelle que E_0 .

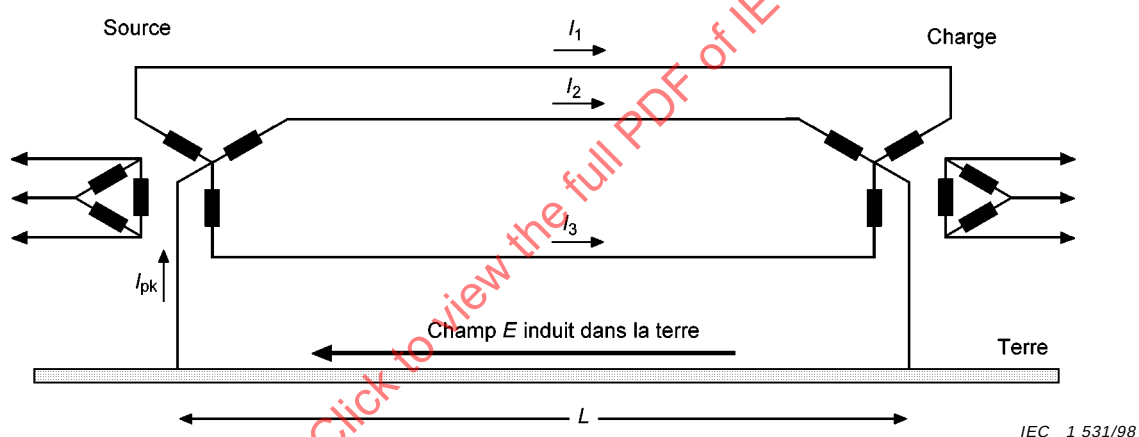


Figure 4a – Ligne triphasée et transformateur

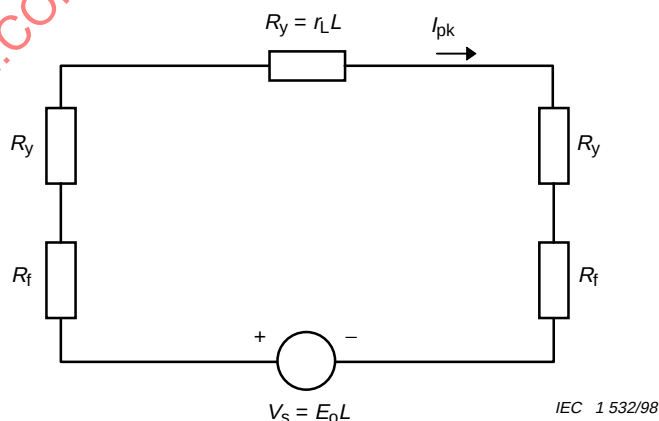


Figure 4b – Circuit équivalent simple dans lequel E_0 est le champ électrique induit par l'IEMN-HA finale

Figure 4 – Ligne triphasée et circuit équivalent permettant de calculer le courant induit par l'IEMN-HA finale

5.4 Late-time HEMP external conducted environment

The late-time HEMP environment is only important for coupling to long external conductors such as power and communication lines. In this case, however, the computation of short circuit currents for typical cases of interest is not easily accomplished. This is because the late-time HEMP environment is described as a voltage source that is produced in the earth which induces currents to flow only in conductors that are connected to the earth at two or more points. Since the current that flows is strongly dependent on the resistance present in the circuit, an analytical method is provided here to develop a standard conducted environment.

In order to describe the method to be used, an example case is provided. In figure 4a, a three-phase Y-delta power configuration is shown along with an equivalent circuit in figure 4b (where E_0 is the peak value of the late-time HEMP). Note that the problem can be described as a quasi-d.c. problem with the voltage source calculated directly from the late-time HEMP environment. Since the highest frequencies contained in the late-time HEMP environment are of the order of 1 Hz, this is clearly appropriate. It can therefore be assumed that the voltage source V_s has the same time dependence as E_0 . Given that the resistances in figure 4b (the parallel Y winding resistances R_y and the "footing" or grounding resistances R_f) are not frequency dependent for $f < 1$ Hz, then the induced current I_{pk} will have the same time dependence as E_0 .

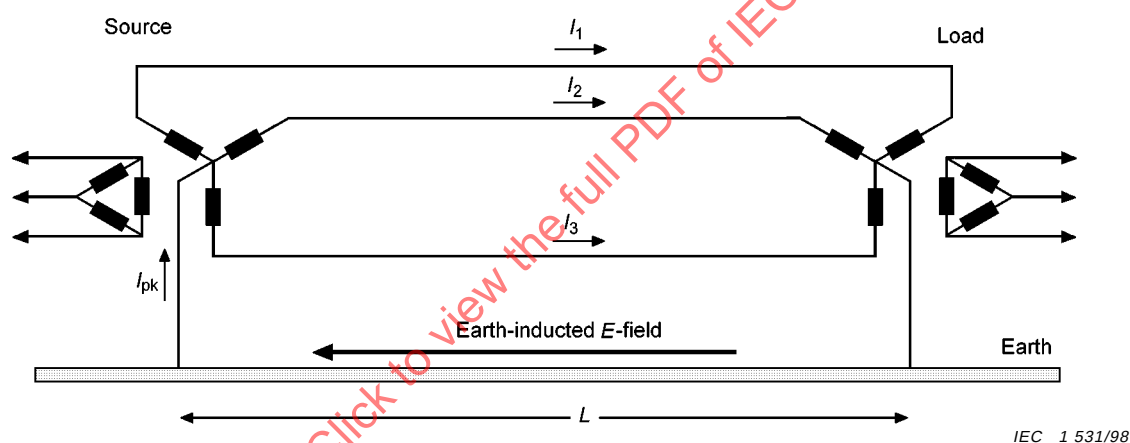


Figure 4a – Three-phase line and transformer configuration

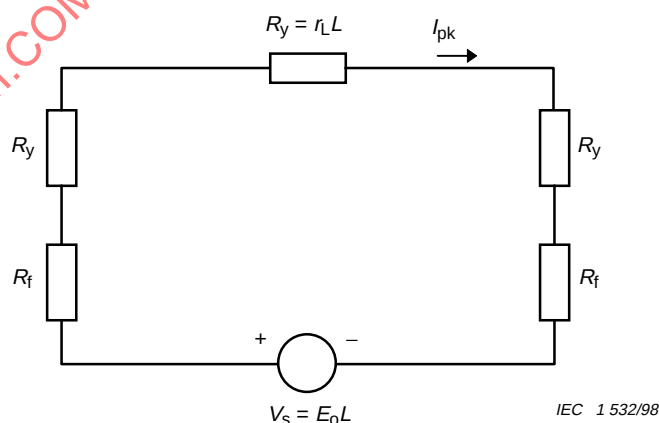


Figure 4b – Simple equivalent circuit where E_0 is the induced late-time HEMP electric field

Figure 4 – Three-phase line and equivalent circuit for computing late-time HEMP conducted current

Dans l'exemple ci-dessus, le courant crête peut être calculé:

$$I_{pk} = \frac{E_o L}{2(R_f + R_y) + r_L L} \quad (1)$$

où

r_L est la résistance de ligne parallèle par unité de longueur (Ω/m);

R_f est la résistance de mise à la masse (Ω);

R_y est la résistance parallèle d'enroulement dans un transformateur (Ω);

L est la longueur de la ligne (m).

En Amérique du Nord, une longue ligne de transmission de 500 kV aurait une résistance par unité de longueur de $8,3 \times 10^{-6} \Omega/m$, une résistance d'enroulement de 0,06 Ω et une résistance de mise à la masse de 0,75 Ω . Pour une ligne de 10^5 m, le courant crête induit est d'environ $40\,000 \times E_o$ (E_o est de 0,04 V/m dans la CEI 61000-2-9 pour une conductivité du sol en profondeur ($d \gg 10$ km) de 10^{-4} S/m) soit approximativement 1 600 A. Etant donné cette valeur crête, la forme temporelle du courant peut être approximée par une impulsion unipolaire avec un temps de montée et une durée à mi-hauteur de 1/50 s. Pour simuler la forme d'onde de cet exemple, il convient d'utiliser une source de tension de 4 kV et de résistance interne 2,45 Ω . Il est nécessaire que le transformateur soit relié à la masse pour pouvoir utiliser le circuit de la figure 4. Certains transformateurs sont triangle/triangle et ne possèdent pas de liaison directe vers la masse.

L'équation 1 ci-dessus peut aisément être extrapolée à d'autres cas que les lignes de transport d'énergie en calculant la résistance totale du circuit et en divisant par cette résistance la tension totale induite sur toute la longueur du conducteur. L'équation 1 est valable pour des câbles longs situés au-dessus du sol; pour des câbles sous-marins, les courants calculés peuvent être réduits d'un facteur 100. Cette réduction est rendue nécessaire par le fait que le champ électrique E_o est inversement proportionnel à la racine carrée de la conductivité du sol (pour des profondeurs de 10 km à 100 km). Pour les lacs d'eau douce ou les mers peu profondes, les courants ne peuvent pas être réduits d'autant.

5.5 Courants antennaires

Les antennes peuvent avoir différentes tailles et formes. Dans la bande de fréquences VLF et LF (3 kHz à 300 kHz), les antennes sont souvent de très longs fils qui peuvent être parfois enterrés. Dans la bande de 300 kHz à 3 000 kHz, les antennes ont souvent la forme de tours verticales situées au-dessus d'un contrepoids en grillage enterré. Dans la bande HF et VHF (3 MHz à 30 MHz et 30 MHz à 300 MHz), les antennes se présentent typiquement sous forme de dipôles alimentés par le milieu et aux fréquences plus élevées (UHF, SHF, etc.), elles ressemblent de plus en plus à des systèmes distribués comportant des réflecteurs et des ouvertures rayonnantes.

Habituellement, les antennes fonctionnent dans une bande étroite située autour de la fréquence fondamentale pour laquelle elles ont été conçues. Pour accroître leurs performances en bande étroite, ces antennes sont souvent accordées en ajoutant des groupes d'éléments impédants, ajoutant des éléments passifs près de l'antenne active ou en mettant l'antenne dans un réseau.

Devant une telle diversité dans la configuration des antennes, il est difficile de donner une spécification précise de la réponse de tous les types d'antenne. Il est toutefois possible d'utiliser le modèle de la simple antenne dipôle montrée à la figure 5 en tant que modèle approximatif et d'utiliser sa réponse comme une indication de ce que serait sa réponse d'autres antennes plus complexes. Bien entendu, ce modèle n'est applicable qu'aux antennes appartenant à la catégorie du dipôle électrique; les antennes boucles (magnétiques) ainsi que les ouvertures ne sont pas modélisées correctement par cette simple structure. Pour des antennes plus complexes, il est recommandé d'effectuer des illuminations en CW ou des essais d'impulsions à haut niveau pour évaluer les réponses de ces antennes.

Using the example provided, the peak current can be calculated as:

$$I_{\text{pk}} = \frac{E_o L}{2(R_f + R_y) + r_L L} \quad (1)$$

where

r_L is the parallel wire resistance per unit length (Ω/m);

R_f is the ground resistance (Ω);

R_y is the parallel winding resistance in one transformer (Ω);

L is the line length (m).

For a long transmission line in North America, a 500 kV line would have a resistance per unit length of $8,3 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$, a transformer winding resistance of $0,06 \Omega$ and a grounding resistance of $0,75 \Omega$. For a 10^5 m length line, this provides a peak current of approximately $40\,000 \times E_o$ (where E_o is given as $0,04 \text{ V/m}$ in IEC 61000-2-9 for a deep ($d \gg 10 \text{ km}$) ground conductivity of 10^{-4} S/m) or approximately $1\,600 \text{ A}$. Given this peak value, the current time waveform can be approximated by a unipolar pulse with a rise time and pulse width of $1/50 \text{ s}$. To simulate the waveform for this example, one should use a voltage source of 4 kV with a source impedance of $2,45 \Omega$. It is important to recognize the necessity to ground transformers in order to use the circuit in figure 4. Some transformers are delta-delta and do not possess a direct path to ground.

Equation 1 above can easily be translated to cover cases other than power lines by computing the total resistance in the circuit, and dividing it into the total voltage induced over the length of the conductor. Equation 1 is provided for the case of long cables over land, and for deep undersea cables, the currents calculated may be reduced by up to a factor of 100. This reduction is due to the behaviour of the electric field E_o which is inversely proportional to the square root of the deep ground conductivity (to depths of 10 km to 100 km). For freshwater lakes or shallow seas, the currents may not be reduced as much.

5.5 Antenna currents

Antennas come in many different sizes and shapes. At frequencies in the VLF and LF range (3 kHz to 300 kHz), such antennas are often in the form of very long wires which are sometimes buried in the earth. Antennas in the MF band (300 kHz to $3\,000 \text{ kHz}$) are often in the form of a vertical tower which is fed against a buried counterpoise grid buried in the earth. In the HF and VHF bands (3 MHz to 30 MHz and 30 MHz to 300 MHz , respectively), the antennas typically appear as centre-fed dipoles, and at the higher frequencies (UHF, SHF, etc.) they become more like a distributed system, involving reflecting dishes and radiating apertures.

Usually, antennas are operated in a narrow band of frequencies located around a fundamental design frequency. In order to enhance their narrow-band performance, such antennas are often "tuned" by adding lumped impedance elements, by adding additional passive elements near the active antenna, or by locating the antenna in an array.

Given such a large variation in antenna configurations, it is difficult to provide an accurate response specification (current and voltage waveforms) for every type of antenna. As an approximate model, however, it is possible to consider the simple thin-wire vertical dipole antenna shown in figure 5, and to use its response as an indication of what would be the responses for other more complex antennas. Of course, this model is applicable only to antennas of the electric dipole class: loop (i.e. magnetic) antennas and aperture antennas are not adequately modelled by this simple structure. For more complex antennas, it is recommended that CW illumination or high level pulse testing be performed to evaluate antenna responses.

Ces types de méthodes d'essai sont décrites dans la CEI 61000-4-23*.

L'antenne de la figure 5 est supposée chargée par une résistance nominale de 50Ω , résistance de charge typique d'une antenne dans sa bande. L'antenne est un cylindre de longueur ℓ (d'extrémité à extrémité) et de rayon a ; ces paramètres définissent le facteur de forme $\Omega = 2 \ln(\ell/a)$. Le facteur Q du courant de charge de cette antenne peut être approximé par $Q = \Omega/3,6$. Pour des antennes non idéales, il convient que le paramètre Q soit tiré des mesures de réponse d'antenne.

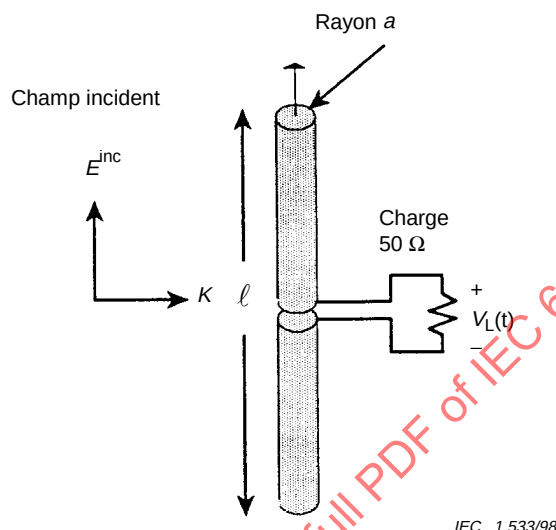


Figure 5 – Antenne dipôle chargée par le centre de longueur ℓ et de rayon a , excitée par un champ incident de l'IEMN-HA initiale

Habituellement, l'antenne de la figure 5 est placée au voisinage d'autres objets conducteurs, ce qui modifie le champ incident et par conséquent la réponse de l'antenne par rapport à celle qui serait obtenue avec une antenne isolée. Par exemple, l'antenne peut être située sur ou à proximité du plan de sol et le champ réfléchi par ce dernier peut renforcer l'excitation de l'antenne. Le dipôle peut aussi être monté sur un mât, le champ diffusé par celui-ci et les câbles d'alimentation modifiera alors l'excitation de l'antenne.

Il est difficile de prendre en compte toutes les possibilités de variation de la géométrie de l'antenne pour développer une forme d'onde normalisée de sa réponse. Toutefois, le problème est légèrement simplifié par le fait que, dans bien des cas, le champ réfléchi arrive sur l'antenne après que le champ incident a excité celle-ci. Ainsi, la réponse au champ incident peut quand même donner une spécification suffisante de la réponse de l'antenne. Dans cette démarche simplifiée de spécification, toutes les excitations dues à des champs diffusés seront négligées.

* 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 (en préparation).

These types of test methods are described in IEC 61000-4-23*.

The antenna in figure 5 is assumed to be loaded by a nominal $50\ \Omega$ resistance, which is typical of a realistic in-band load on the antenna. The antenna has an end-to-end length of ℓ and a radius of a ; these parameters are used to compute the form parameter $\Omega = 2 \ln(\ell/a)$. The resonance bandwidth factor Q of the load current of this antenna may be approximated by $Q = \Omega/3,6$. For non-ideal antennas, the Q parameter should be derived from antenna response measurements.

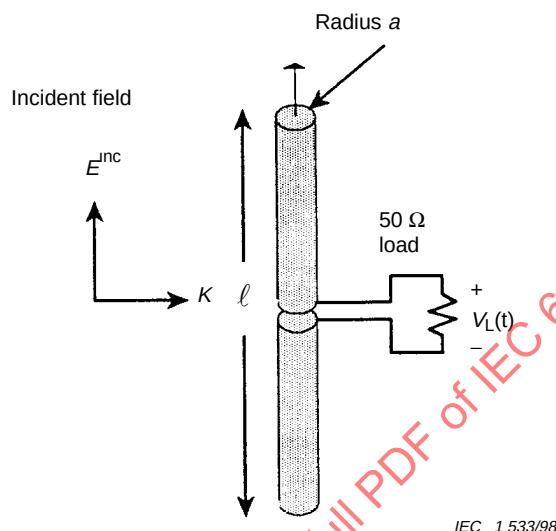


Figure 5 – A centre-loaded dipole antenna of length ℓ and radius a , excited by an incident early-time HEMP field

Usually the antenna of figure 5 is located in the vicinity of other conducting bodies that modify the incident field and, consequently, change the response from that obtained for the isolated antenna. For example, the antenna can be located on or near the ground where an earth-reflected field can provide an additional antenna excitation. Equally the dipole might be mounted on a long mast where the scattered field from the mast and support wires will modify the excitation.

As with the variations in the antenna geometry, it is difficult to take into account all of these possibilities in developing a standard response waveform. The problem is made a bit easier, however, by the fact that in many cases, the reflected field arrives at the antenna after the incident field has excited the antenna, suggesting that the incident field response can still provide an adequate specification of the response. For this simplified specification process, the influence of any scattered field excitation is neglected.

* 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 (in preparation).

Dans le calcul de la réponse de l'antenne, la fréquence fondamentale de résonance est donnée par

$$f_c = \frac{c}{2\ell} \quad (2)$$

où

c est la vitesse de la lumière, et

ℓ est la longueur totale du dipôle ou le double de la hauteur du monopôle au-dessus du plan de sol.

La réponse de l'antenne est alors donnée comme un courant dans une charge de 50 Ω :

$$I_L(t) = k I_p e^{-\frac{\pi f_c t}{Q}} \sin(2\pi f_c t) \quad \text{pour } t \geq 0 \quad (3)$$

avec I_p défini ci-dessous dans le tableau 3. Le facteur normalisé k dépend de la valeur de Q et de f_c et permet à I_L d'avoir une valeur crête égale à I_p . Dans le tableau 3, I_p est défini comme le produit $\ell \hat{I}$, avec $\hat{I}$ champ magnétique crête incident produit par l'IEMN-HA. En dessous de 10 MHz, le courant crête est supposé constant.

Tableau 3 – Courant de charge crête maximum d'un dipôle électrique en fonction de la fréquence

f_c MHz	ℓ m	$\hat{I}$ A/m	$\ell \hat{I}$ A	I_p A
<1	>150	–	–	2 000*
1 – 10	15 – 150	–	–	2 000*
10	15	130	1 950	1 950
100	1,5	130	195	195
200	0,75	130	97,5	97,5
>200	$150/f_c$	130	$19\,500/f_c$	$19\,500/f_c$
* Valeur maximale permise.				

L'approche précédente donne des résultats de couplage proches du pire cas pour une antenne dipôle verticale (sans tenir compte des réflexions sur le sol) mais il est possible d'obtenir des informations statistiques sur le couplage en utilisant une méthode similaire à celle employée plus haut dans le tableau 1. En considérant la variation de l'angle d'élévation avec la couverture au sol pour une hauteur d'explosion de 100 km, l'annexe C fournit des résultats de couplage détaillés pour deux antennes à fil mince: un monopôle vertical de longueur ℓ_m (en tenant compte des réflexions de l'IEMN-HA sur le sol) et un dipôle horizontal de longueur ℓ_h (sans réflexion sur le sol), tous les deux chargés sur 50 Ω . Ces résultats sont résumés dans les tableaux 4 à 6 pour le monopôle vertical et dans les tableaux 7 à 9 pour le dipôle horizontal.

To calculate the response of the antenna, the fundamental resonance frequency is given by

$$f_c = \frac{c}{2\ell} \quad (2)$$

where

c is the speed of light, and

ℓ is the total length of a dipole or twice the height of a monopole over a ground plane.

The response of the antenna is then given as a load current into 50 Ω :

$$I_L(t) = k I_p e^{\frac{-\pi f_c t}{Q}} \sin(2\pi f_c t) \quad \text{for } t \geq 0 \quad (3)$$

with I_p defined below in table 3. The normalizing factor k is defined to allow I_L to peak at a value of I_p , and it depends on the values of Q and f_c . In table 3, I_p is defined as the product $\ell \hat{I}$, where $\hat{I}$ is the peak incident HEMP magnetic field. Below 10 MHz the peak antenna current is assumed constant.

Table 3 – Maximum peak electric dipole antenna load current versus frequency for antenna principal frequencies

f_c MHz	ℓ m	$\hat{I}$ A/m	$\ell \hat{I}$ A	I_p A
<1	>150	–	–	2 000*
1 – 10	15 – 150	–	–	2 000*
10	15	130	1 950	1 950
100	1,5	130	195	195
200	0,75	130	97,5	97,5
>200	$150/f_c$	130	$19\,500/f_c$	$19\,500/f_c$

* Maximum allowed value.

While the previous approach provides near-worst case coupling results for a thin-wire vertical dipole antenna (but without earth reflections), it is possible to provide probabilistic coupling information using a technique similar to that employed earlier in table 1. Using an approach which considers the variation of the angle of elevation with area coverage from a 100 km burst height, annex C provides detailed coupling results for two thin wire antennas. These include a vertical monopole antenna of length ℓ_m (including HEMP earth reflections) and a horizontal dipole antenna of length ℓ_h (without earth reflections), both with 50 Ω loads. These results are summarized in tables 4 to 6 for the vertical monopole antenna and tables 7 to 9 for the horizontal dipole.

Tableau 4 – Niveaux de V_{co} générés par une IEMN-HA pour une antenne monopôle verticale

Valeurs en kV

Longueur ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m		
Sévérité	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Angle de site												
0°	13,6	28,4	33,6	46,5	91,7	104,6	125,7	232,0	249,0	383,2	470,7	477,1
15°	13,1	27,0	32,4	45,1	88,5	101,1	125,3	226,2	240,5	365,5	454,0	461,0
30°	11,8	24,3	29,0	40,5	80,3	90,4	107,2	200,2	215,5	326,9	406,9	413,1
45°	9,5	19,5	23,7	32,7	64,9	73,8	89,0	164,3	175,9	273,6	332,3	337,3
60°	6,6	14,1	16,5	23,3	45,6	52,1	63,9	116,4	124,4	190,1	234,8	238,4
75°	3,5	7,2	8,6	12,0	23,9	26,9	33,2	60,1	64,3	98,8	121,6	123,3
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 5 – Niveau de I_{cc} généré par une IEMN-HA pour une antenne monopôle verticale

Valeurs en kA

Longueur ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m		
Sévérité	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Angle de site												
0°	0,08	0,19	0,22	0,33	0,66	0,70	1,12	1,74	1,91	3,13	3,68	4,37
15°	0,08	0,18	0,21	0,32	0,64	0,68	1,13	1,68	1,85	3,02	3,55	4,31
30°	0,07	0,16	0,19	0,28	0,57	0,61	0,96	1,50	1,65	2,71	3,25	4,13
45°	0,06	0,13	0,16	0,23	0,47	0,50	0,79	1,23	1,35	2,23	2,72	3,67
60°	0,04	0,10	0,11	0,16	0,33	0,35	0,57	0,87	0,95	1,57	1,94	2,73
75°	0,02	0,05	0,06	0,08	0,17	0,18	0,30	0,45	0,49	0,81	1,01	1,38
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 6 – Niveau de I_L généré par une IEMN-HA pour une antenne monopôle verticale adaptée*

Valeurs en kA

Longueur ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m		
Sévérité	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Angle de site												
0°	0,06	0,15	0,17	0,23	0,49	0,55	0,76	1,31	1,33	2,37	2,71	3,53
15°	0,06	0,14	0,16	0,23	0,48	0,53	0,76	1,26	1,29	2,28	2,59	3,34
30°	0,05	0,13	0,15	0,20	0,43	0,47	0,65	1,13	1,15	2,03	2,32	3,00
45°	0,04	0,10	0,12	0,16	0,35	0,39	0,54	0,92	0,94	1,69	1,91	2,51
60°	0,03	0,07	0,08	0,12	0,25	0,27	0,39	0,65	0,67	1,17	1,35	1,79
75°	0,02	0,04	0,04	0,06	0,13	0,14	0,20	0,34	0,34	0,61	0,70	0,91
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* Pour trouver les valeurs de la tension sur la charge, multiplier ces valeurs par 50 Ω .

Table 4 – HEMP response levels for V_{oc} for the vertical monopole antenna

Values are in kV

Length ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m		
Severity	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Dip angle												
0°	13,6	28,4	33,6	46,5	91,7	104,6	125,7	232,0	249,0	383,2	470,7	477,1
15°	13,1	27,0	32,4	45,1	88,5	101,1	125,3	226,2	240,5	365,5	454,0	461,0
30°	11,8	24,3	29,0	40,5	80,3	90,4	107,2	200,2	215,5	326,9	406,9	413,1
45°	9,5	19,5	23,7	32,7	64,9	73,8	89,0	164,3	175,9	273,6	332,3	337,3
60°	6,6	14,1	16,5	23,3	45,6	52,1	63,9	116,4	124,4	190,1	234,8	238,4
75°	3,5	7,2	8,6	12,0	23,9	26,9	33,2	60,1	64,3	98,8	121,6	123,3
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 5 – HEMP response levels for I_{sc} for the vertical monopole antenna

Values are in kA

Length ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m		
Severity	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Dip angle												
0°	0,08	0,19	0,22	0,33	0,66	0,70	1,12	1,74	1,91	3,13	3,68	4,37
15°	0,08	0,18	0,21	0,32	0,64	0,68	1,13	1,68	1,85	3,02	3,55	4,31
30°	0,07	0,16	0,19	0,28	0,57	0,61	0,96	1,50	1,65	2,71	3,25	4,13
45°	0,06	0,13	0,16	0,23	0,47	0,50	0,79	1,23	1,35	2,23	2,72	3,67
60°	0,04	0,10	0,11	0,16	0,33	0,35	0,57	0,87	0,95	1,57	1,94	2,73
75°	0,02	0,05	0,06	0,08	0,17	0,18	0,30	0,45	0,49	0,81	1,01	1,38
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 6 – HEMP response levels for I_L for the loaded vertical monopole antenna*

Values are in kA

Length ℓ_m	1 m			3 m			10 m			100 m		
Severity	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Dip angle												
0°	0,06	0,15	0,17	0,23	0,49	0,55	0,76	1,31	1,33	2,37	2,71	3,53
15°	0,06	0,14	0,16	0,23	0,48	0,53	0,76	1,26	1,29	2,28	2,59	3,34
30°	0,05	0,13	0,15	0,20	0,43	0,47	0,65	1,13	1,15	2,03	2,32	3,00
45°	0,04	0,10	0,12	0,16	0,35	0,39	0,54	0,92	0,94	1,69	1,91	2,51
60°	0,03	0,07	0,08	0,12	0,25	0,27	0,39	0,65	0,67	1,17	1,35	1,79
75°	0,02	0,04	0,04	0,06	0,13	0,14	0,20	0,34	0,34	0,61	0,70	0,91
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* For the corresponding load voltage values, multiply these values by 50 Ω .

Tableau 7 – Niveaux de V_{co} généré par une IEMN-HA pour une antenne dipôle horizontale

Valeurs en kV

Longueur ℓ_h	1 m			3 m			10 m			100 m		
Sévérité	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Angle de site												
0°	0,8	4,0	11,5	2,8	13,5	44,0	7,9	37,9	110,4	19,0	99,8	289,1
15°	4,9	7,0	13,1	17,1	25,1	45,8	44,3	68,2	113,3	115,3	162,2	309,1
30°	8,9	12,5	15,4	31,0	45,6	53,9	81,3	128,1	154,6	211,9	291,0	367,3
45°	12,5	17,6	18,6	43,1	64,1	67,3	112,7	179,7	188,2	293,9	407,4	434,7
60°	15,1	21,4	21,9	52,5	78,2	79,8	136,2	218,6	224,0	355,4	495,9	508,0
75°	16,8	23,9	24,2	58,3	87,0	88,4	152,2	243,9	248,6	395,1	552,1	563,6
90°	18,0	24,6	25,1	60,0	89,9	91,5	159,4	251,7	257,2	404,8	573,1	583,3

Tableau 8 – Niveau de I_{cc} généré par une IEMN-HA pour une antenne dipôle horizontale

Valeurs en kA

Longueur ℓ_h	1 m			3 m			10 m			100 m		
Sévérité	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Angle de site												
0°	0,003	0,01	0,04	0,01	0,05	0,15	0,03	0,16	0,47	0,10	0,53	1,66
15°	0,02	0,02	0,04	0,06	0,09	0,17	0,19	0,27	0,48	0,55	0,81	1,71
30°	0,03	0,04	0,05	0,11	0,17	0,20	0,35	0,49	0,62	1,04	1,36	1,99
45°	0,04	0,06	0,06	0,15	0,24	0,25	0,49	0,69	0,73	1,47	1,87	2,27
60°	0,05	0,07	0,07	0,18	0,29	0,30	0,59	0,84	0,86	1,79	2,27	2,52
75°	0,05	0,08	0,08	0,20	0,32	0,33	0,65	0,94	0,96	2,00	2,52	2,65
90°	0,05	0,08	0,08	0,21	0,34	0,34	0,67	0,97	0,99	2,06	2,61	2,69

Tableau 9 – Niveau de L généré par une IEMN-HA pour une antenne dipôle horizontale adaptée*

Valeurs en kA

Longueur, ℓ_h	1 m			3 m			10 m			100 m		
Sévérité	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Angle de site												
0°	0,002	0,012	0,032	0,008	0,040	0,13	0,028	0,14	0,39	0,078	0,42	1,26
15°	0,014	0,020	0,036	0,050	0,078	0,14	0,16	0,23	0,40	0,45	0,65	1,33
30°	0,024	0,036	0,044	0,092	0,15	0,17	0,29	0,44	0,54	0,84	1,10	1,58
45°	0,034	0,050	0,054	0,13	0,20	0,22	0,41	0,61	0,64	1,17	1,51	1,83
60°	0,042	0,062	0,062	0,16	0,25	0,26	0,50	0,74	0,76	1,44	1,83	2,05
75°	0,046	0,068	0,070	0,17	0,28	0,29	0,55	0,83	0,85	1,60	2,04	2,18
90°	0,048	0,070	0,072	0,17	0,28	0,30	0,57	0,86	0,88	1,66	2,10	2,22

* Pour trouver les valeurs de la tension sur la charge, multiplier ces valeurs par 50 Ω .

Table 7 – HEMP response levels for V_{oc} for the horizontal dipole antenna

Values are in kV

Length ℓ_h	1 m			3 m			10 m			100 m		
Severity	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Dip angle												
0°	0,8	4,0	11,5	2,8	13,5	44,0	7,9	37,9	110,4	19,0	99,8	289,1
15°	4,9	7,0	13,1	17,1	25,1	45,8	44,3	68,2	113,3	115,3	162,2	309,1
30°	8,9	12,5	15,4	31,0	45,6	53,9	81,3	128,1	154,6	211,9	291,0	367,3
45°	12,5	17,6	18,6	43,1	64,1	67,3	112,7	179,7	188,2	293,9	407,4	434,7
60°	15,1	21,4	21,9	52,5	78,2	79,8	136,2	218,6	224,0	355,4	495,9	508,0
75°	16,8	23,9	24,2	58,3	87,0	88,4	152,2	243,9	248,6	395,1	552,1	563,6
90°	18,0	24,6	25,1	60,0	89,9	91,5	159,4	251,7	257,2	404,8	573,1	583,3

Table 8 – HEMP response levels for I_{sc} for the horizontal dipole antenna

Values are in kA

Length ℓ_h	1 m			3 m			10 m			100 m		
Severity	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Dip angle												
0°	0,003	0,01	0,04	0,01	0,05	0,15	0,03	0,16	0,47	0,10	0,53	1,66
15°	0,02	0,02	0,04	0,06	0,09	0,17	0,19	0,27	0,48	0,55	0,81	1,71
30°	0,03	0,04	0,05	0,11	0,17	0,20	0,35	0,49	0,62	1,04	1,36	1,99
45°	0,04	0,06	0,06	0,15	0,24	0,25	0,49	0,69	0,73	1,47	1,87	2,27
60°	0,05	0,07	0,07	0,18	0,29	0,30	0,59	0,84	0,86	1,79	2,27	2,52
75°	0,05	0,08	0,08	0,20	0,32	0,33	0,65	0,94	0,96	2,00	2,52	2,65
90°	0,05	0,08	0,08	0,21	0,34	0,34	0,67	0,97	0,99	2,06	2,61	2,69

Table 9 – HEMP response levels for I_L for the loaded horizontal dipole antenna*

Values are in kA

Length ℓ_h	1 m			3 m			10 m			100 m		
Severity	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %	50 %	90 %	99 %
Dip angle												
0°	0,002	0,012	0,032	0,008	0,040	0,13	0,028	0,14	0,39	0,078	0,42	1,26
15°	0,014	0,020	0,036	0,050	0,078	0,14	0,16	0,23	0,40	0,45	0,65	1,33
30°	0,024	0,036	0,044	0,092	0,15	0,17	0,29	0,44	0,54	0,84	1,10	1,58
45°	0,034	0,050	0,054	0,13	0,20	0,22	0,41	0,61	0,64	1,17	1,51	1,83
60°	0,042	0,062	0,062	0,16	0,25	0,26	0,50	0,74	0,76	1,44	1,83	2,05
75°	0,046	0,068	0,070	0,17	0,28	0,29	0,55	0,83	0,85	1,60	2,04	2,18
90°	0,048	0,070	0,072	0,17	0,28	0,30	0,57	0,86	0,88	1,66	2,10	2,22

* For the corresponding load voltage values, multiply these values by 50 Ω .

5.6 Environnements conduits internes dus à l'IEMN-HA

Comme cela a été expliqué précédemment, les environnements conduits internes (à l'intérieur d'un bâtiment ou d'une installation) sont plus difficiles à déterminer que les environnements conduits externes. Les signaux conduits internes sont générés par des signaux conduits externes qui pénètrent à travers un blindage (avec ou sans atténuation due au durcissement d'un PdE) et par tous les champs de l'IEMN-HA qui peuvent pénétrer dans le bâtiment et se coupler aux câbles exposés. Il existe une grande variété de matériaux de blindage électromagnétique utilisables dans le bâtiment, depuis la construction en bois jusqu'à l'enceinte blindée à hautes performances en acier soudé. C'est pourquoi il est difficile de calculer le couplage à des câbles ou autres conducteurs à l'intérieur d'une installation. Il est toutefois possible de définir une procédure simple qui permet d'estimer les parasites internes conduits.

La première étape dans la résolution du problème du conducteur interne est de reconnaître que l'affaiblissement du parasite conduit externe est une considération majeure. Il convient d'utiliser les environnements externes spécifiés précédemment et de déterminer le type de protection présent aux points d'entrée dans l'installation. En utilisant soit des résultats d'analyses soit des résultats d'essais, on peut alors estimer la forme du courant qui pénètre dans l'installation. Il convient de souligner qu'en cas d'utilisation d'un élément non linéaire, il sera probablement nécessaire de faire un essai utilisant la CEI 61000-4-24, à moins que la capacité d'antiparasitage attendue ne soit très importante.

La deuxième étape consiste à estimer l'atténuation électromagnétique produite sur l'environnement rayonné dû à l'IEMN-HA initiale. (Il n'est pas nécessaire d'évaluer l'atténuation du champ généré par l'onde intermédiaire et l'onde finale car ces champs basse fréquence ne se coupleront pas efficacement sur les géométries de câbles, généralement compactes, présentes dans la plupart des installations). Une fois défini le facteur d'atténuation en onde plane A_t (pour $f > 1$ MHz), D étant la longueur du câble interne considéré en mètres et B un facteur d'amplitude basé sur les facteurs de sévérité décrits dans le tableau 1, on peut estimer le courant de mode commun crête interne sur le câble I_{pk} à

$$I_{pk} = BDA_t \text{ pour } D < 100 \text{ m} \quad (4)$$

Le paramètre B (A/m) a été calculé afin que le produit BD soit cohérent avec la dernière colonne du tableau 1. Les valeurs de B sont 5,0 A/m; 7,5 A/m et 20 A/m pour les niveaux de sévérité 50 %, 90 % et 99 % respectivement. Ainsi, pour un niveau de sévérité de 50 %, un facteur d'atténuation du bâtiment de 0,01 (–40 dB) et une longueur de conducteur de 10 m, le courant crête couplé est de 0,5 A. Comme indiqué en annexe D, les formes des courants induits ressemblent à des sinusoïdes amorties. Il convient que les équations (2) et (3) soient employées en supposant que $\ell = D$ et $Q \geq 60$.

Cette méthode n'est pas précise car l'atténuation d'un champ électromagnétique incident varie avec la fréquence, surtout en présence d'ouvertures. De plus, une fois le champ interne estimé, il y a souvent plusieurs câbles en présence ce qui rend un calcul de couplage précis difficile. Enfin, la taille et la forme du bâtiment vont produire des modes de cavité qui vont influencer la forme d'onde des courants couplés. En dépit de ces inconvénients, cette méthode peut donner une estimation raisonnable des courants induits internes.

La seconde alternative pour estimer les courants I_{pk} internes induits par une IEMN-HA consiste à utiliser directement les données collectées dans le passé pour trois classes de bâtiment. L'annexe D, donne les sévérités de courant à 50 %, 90 % et 99 % pour des constructions en parpaing, en métal riveté et en béton armé. Les courants crête à crête à 50 % sont de 10 A, 10 A et 3 A pour les trois méthodes de construction et les valeurs à 99 % sont de 25 A, 25 A et 7 A, respectivement. Ces courants internes sont dus uniquement au couplage du champ IEMN-HA externe et ne tiennent pas compte de la contribution des courants qui pénètrent dans le bâtiment par les conducteurs extérieurs. Les équations (2) et (3) (avec $f_c = 7$ MHz et $Q \geq 60$) donnent les formes d'onde temporelles de ces courants.

5.6 HEMP internal conducted environments

As discussed previously, the internal conducted environments (inside of a building or installation) are more difficult to determine than the external conducted environments. The internal conducted signals are produced by external conducted signals which penetrate through a shield (with or without attenuation due to PoE hardening), and by any HEMP fields which are able to penetrate the building and couple to exposed wiring. Because there is a large variety of electromagnetic shield materials for buildings which range from wood construction to high-quality welded steel shield rooms, it is difficult to calculate the coupling to cables and other conductors inside a facility. It is, however, possible to define a simple procedure which will allow one to estimate the internal conducted transients.

The first step in the internal conductor problem is to recognize that the leakage of external conducted transients is a major consideration. One should take the conducted environments specified above and determine the type of protection present at the entry point into the facility. Using either analyses or test data, one can estimate the current waveform that penetrates the facility. It should be noted that if a non-linear device is present, it will probably be necessary to perform a test using IEC 61000-4-24, unless the amount of suppression is expected to be very high.

The second step is to estimate the amount of electromagnetic attenuation that will occur for the early-time HEMP radiated environment. (It is not necessary to evaluate the intermediate or late-time field attenuation because those low frequency fields will not couple well to the compact cable geometries present inside most facilities.) Defining A_t as the plane wave attenuation factor (for $f > 1$ MHz), D as the internal cable length of interest in metres, and B as an amplitude factor based on the severity factors introduced in table 1, one may estimate the peak internal common mode cable current I_{pk} as

$$I_{pk} = BDA_t \text{ for } D < 100 \text{ m} \quad (4)$$

The amplitude parameter B in units of A/m has been developed so the product BD is consistent with the last column in table 1, elevated conductor; B is defined as 5,0 A/m, 7,5 A/m and 20 A/m for severity levels of 50 %, 90 % and 99 %, respectively. Therefore for a severity level of 50 %, a building attenuation factor of 0,01 (–40 dB) and a conductor length of 10 m, the peak coupled current is 0,5 A. As indicated in annex D, the current waveforms produced are expected to resemble damped sinusoids. Equations (2) and (3) should be employed assuming $\ell = D$ and $Q \geq 60$.

This process is not precise because the attenuation of an incident electromagnetic field is not uniform with frequency, especially if apertures are present. In addition, once the internal field is established, there are often many cables present that make accurate coupling calculations difficult. Finally, the size and shape of a facility will produce cavity modes that will impact the waveshape of the coupled currents. In spite of these difficulties, this procedure can provide a rough estimate of the internal conducted currents.

A second alternate procedure for estimating internal conducted currents I_{pk} due to HEMP includes the direct use of data collected in the past for three classes of building construction. As provided in annex D, the 50 %, 90 %, and 99 % severity currents are given for concrete block, riveted metal and poured concrete construction. 50 % peak-to-peak currents are 10 A, 10 A and 3 A for the three construction methods, while the 99 % values are 25 A, 25 A and 7 A, respectively. These internal currents are due only to external HEMP field coupling and do not include the contribution of currents which enter through penetrating conductors. The time waveforms of the currents are found using equations (2) and (3), with $f_c = 7$ MHz and $Q \geq 60$.

Une troisième (et plus précise) procédure d'évaluation des courants sur les conducteurs internes passe par des mesures expérimentales. Cette méthode implique généralement l'utilisation d'un simulateur à ondes entretenues dans la bande de 100 kHz à 500 MHz. Les courants sur les câbles internes sont mesurés durant l'illumination du bâtiment dans plusieurs positions selon différents angles d'élévation et polarisations. Les fonctions de transferts obtenues sont alors convoluées à la forme d'onde de l'IEMN-HA initiale incidente pour calculer les formes des courants sur les conducteurs internes. Il est généralement nécessaire d'évaluer la variation des valeurs crêtes des courants et des formes d'impulsion afin de développer des formes d'ondes combinées pour tester les équipements.

Il est important de souligner que les trois procédures indiquées ci-dessus donnent seulement les courants internes dus au couplage direct des champs IEMN-HA. Il est nécessaire d'estimer (ou de mesurer) l'affaiblissement des courants provenant de l'extérieur à travers les murs de l'installation (en tenant compte des protections contre les surtensions) afin de déterminer la contribution de ces courants externes aux courants internes totaux.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-2-10:1998

A third (and most accurate) procedure for deriving the internal conductor currents is through experimental measurements. The procedure usually involves the use of a continuous wave simulator over the range of 100 kHz to 500 MHz. The building is exposed at several positions for different angles of elevation and field polarizations while measuring the internal cable currents. The transfer functions are then convolved with the incident early-time HEMP waveform to compute internal cable current waveforms. It is usually necessary to evaluate the variation of the current waveform peak values and pulse shapes to develop composite waveforms for equipment testing purposes.

It is important to recognize that the three procedures indicated here provide only the internal currents due to direct HEMP field coupling. It is necessary to estimate (or measure) the leakage of external currents through the facility walls (including surge protection) to determine the contribution of the external currents to the total internal currents.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-2-10:1998

Annexe A (informative)

Discussion du couplage de l'IEMN-HA initiale avec des lignes longues

A.1 Lignes aériennes

Les résultats présentés dans le tableau 1 sont issus d'une série de calculs statistiques de couplages réalisés par Ianoz et al [A.1]*. Dans ces calculs, les auteurs utilisent le champ électrique de l'IEMN-HA initiale comme défini dans la CEI 61000-2-9 pour évaluer le couplage (courant de court circuit) sur une ligne située à 10 m de hauteur, d'une longueur de 1 km et située au-dessus d'un sol de conductivité 10^{-2} S/m. Les calculs ont été faits successivement pour une polarisation 100 % horizontale et 100 % verticale. Pour chaque polarisation, on a fait varier les angles de site ψ et d'azimut ϕ entre le vecteur de propagation du champ incident et la ligne, par pas de $2,5^\circ$. Ces résultats ont été sauvegardés et recombinaés pour chaque hauteur d'explosion et chaque localisation du point d'explosion (définie par la latitude géomagnétique) choisies.

Un résumé des calculs pour une altitude d'explosion de 100 km et pour cinq angles d'inclinaison magnétique (0° , 45° , 67° , 75° et 90°) est présenté à la figure A.1. Les résultats obtenus pour une inclinaison magnétique de 0° ont été écartés, car les calculs de couplage ne prennent pas en compte la réduction du champ électrique de l'IEMN-HA due à une plus faible valeur du champ magnétique terrestre à l'équateur magnétique. Il en aurait résulté une réduction du champ incident et des courants induits de 30 % à 40 %. A partir des résultats montrés à la figure A.1 ($\theta_{\text{dip}} > 45^\circ$), les courants de 4 000 A pour 1,0 % des cas, 1 500 A pour 10 % des cas et 500 A pour 50 % des cas ont été choisis (avec une précision de 10 %). Les probabilités de 1 %, 10 %, 50 % dont il est question ici se rapportent aux niveaux de sévérité de 99 %, 90 % et 50 % mentionnés à l'article 5.

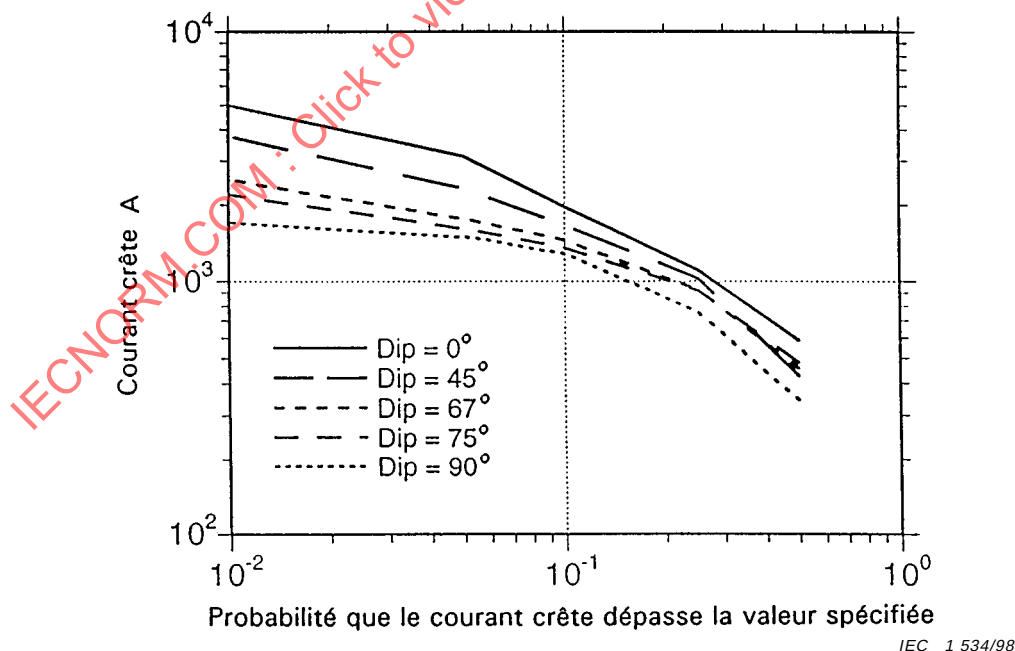


Figure A.1 – Variation du courant crête couplé sur un câble en fonction de l'angle d'inclinaison géomagnétique locale

* Le chiffre entre crochets renvoie au document de référence donné à l'article A.3.

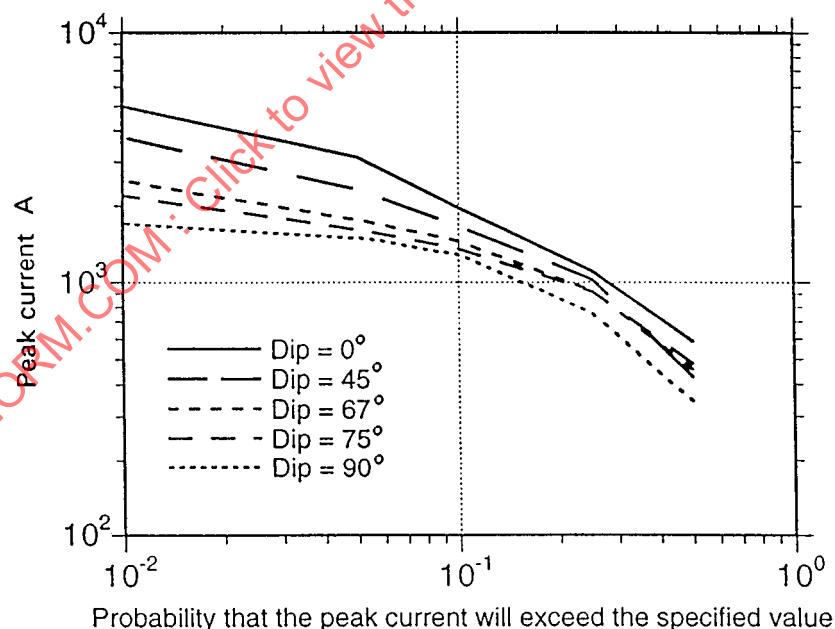
Annex A (informative)

Discussion of early-time HEMP coupling for long lines

A.1 Elevated lines

The results presented earlier in table 1 were produced from a series of probabilistic coupling calculations from Ianoz et al [A.1]*. In these calculations, the authors used the IEC early-time HEMP electric field pulse as defined in IEC 61000-2-9 to compute the coupling (short-circuit current) to a 10 m high, 1 km long line over a ground with a 10^{-2} S/m conductivity. The calculations were performed separately for both 100 % horizontal and 100 % vertical polarization. For each polarization, angles of elevation ψ and azimuth ϕ between the incident field propagation vector and the line were varied over a $2,5^\circ$ mesh. These results were saved and recombined for any burst height and earth location (by the geomagnetic latitude) of interest.

Figure A.1 presents a summary of the calculations for a 100 km burst for five magnetic dip angles (0° , 45° , 67° , 75° and 90°). For the coupling results, the 0° degree results were not used here because the coupling calculations did not consider the reduction of the HEMP electric field due to the lower value of earth's magnetic field at the magnetic equator. This would result in a reduction of the incident field and the coupled currents by 30 % to 40 %. From the results shown ($\theta_{\text{dip}} > 45^\circ$) in figure A.1, the selection of 4 000 A for 1,0 % of the cases, 1 500 A for 10 %, and 500 A for 50 % is indicated (within 10 % accuracy). The 1 %, 10 %, and 50 % probabilities discussed in this annex are equivalent to the 99 %, 90 % and 50 % severity levels discussed in clause 5.



IEC 1534/98

Figure A.1 – Variation of peak coupled cable current versus local geomagnetic dip angle

* The figure in square brackets refers to the reference document in clause A.3.

Pour obtenir les caractéristiques des formes d'onde temporelles du courant présentées dans cette norme, l'étude présentée en [A.1] a aussi considéré plusieurs caractéristiques de la forme d'onde, notamment le temps de montée (10 % – 90 %) et l'impulsion corrigée qui est en fait la surface de l'impulsion pour une impulsion monopolaire. Les valeurs de l'impulsion corrigée pour une polarisation verticale sont données dans le tableau A.1 ainsi que le calcul de la largeur efficace de l'impulsion corrigée, $\Delta t_{pw \text{ eff.}}$ (impulsion rectifiée divisée par la valeur crête), pour les courants crêtes spécifiés.

Tableau A.1 – Impulsion rectifiée (I_R) et largeur efficace d'impulsion calculée pour une polarisation verticale de l'IEMN-HA initiale couplée sur un conducteur aérien ($h = 10 \text{ m}$)

Probabilité %	$I_R >$ $A \times s$	$I \text{ crête} >$ A	$\Delta t_{pw \text{ eff.}}$ ns
50	$3,7 \times 10^{-5}$	500	74
10	$1,9 \times 10^{-4}$	1 500	127
1	$3,0 \times 10^{-4}$	4 000	75

Dans cette évaluation, une largeur efficace maximale d'impulsion de 127 ns est choisie et permet d'obtenir une largeur d'impulsion à mi-amplitude de 88 ns en supposant une forme d'onde à décroissance exponentielle. Cette valeur est arrondie à 100 ns dans le tableau 1.

L'évaluation des caractéristiques du temps de montée a présenté plus de difficultés. La référence [A.1] présente des tableaux de temps de montée 10 % à 90 % pour des polarisations de l'IEMN-HA verticale et horizontale. Les valeurs minimales du temps de montée indiquées sont de 2,3 ns et 5,1 ns respectivement pour une polarisation horizontale et une polarisation verticale. Un examen attentif des résultats montre que ces temps de montées ne correspondent pas aux courants crêtes les plus importants. Comme les dérivées n'étaient pas calculées dans cette étude, des calculs complémentaires ont été nécessaires.

Pour une polarisation totalement verticale du champ électrique défini par la CEI, un angle de site de 5° et, pour la même géométrie de couplage que celle de la référence A.1, la dérivée maximale du courant calculée a été de $2,7 \times 10^{11} \text{ A/s}$. Cette valeur maximale a été trouvée après une série de calculs et la valeur crête du courant induit a été calculée pour ce même angle. Dans le cas d'une probabilité de 1 %, la valeur calculée du temps de montée 10 % – 90 % est

$$(0,8) \times (4\,000 \text{ A}) / (2,7 \times 10^{11} \text{ A/s}) = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Dans cette norme, la valeur de 10 ns a été choisie pour le temps de montée. Bien que des temps de montée plus lents soient probablement appropriés dans la majeure partie des cas, les calculs montrent que dans le cas d'une probabilité de 50 %, le temps de montée est de 14,4 ns. Donc, compte tenu de la différence relativement faible entre ces valeurs, le même temps de montée est utilisé pour tous les cas du tableau 1.

A.2 Couplage sur une ligne enterrée

Pour les lignes de communication ou d'alimentation enterrées, le signal induit par l'IEMN-HA ne varie pas de façon significative avec la polarisation du champ ou l'angle d'inclinaison. Toutefois, la conductivité du sol en surface revêt quelque importance. Des calculs de couplage de l'IEMN-HA utilisant l'onde CEI ont été effectués pour une ligne enterrée à une profondeur de 1,0 m et pour trois conductivités différentes: 10^{-2} S/m , 10^{-3} S/m et 10^{-4} S/m . Les résultats de 42 simulations comportant des variations d'angle de site et de polarisation de champ sont résumés ci-après dans le tableau A.2.

For the time waveform current characteristics presented in this standard, the study performed in [A.1] also considered several waveform characteristics including the waveform rise time (10 % – 90 %) and the rectified impulse which is the pulse area for a monopolar pulse. The rectified impulse values for the vertical polarizations are given in table A.1 along with the computation of the effective pulse width, Δt_{pw} r.m.s. (rectified impulse divided by peak), using the specified peak currents.

Table A.1 – Rectified impulse (RI) and computed effective pulse widths for vertical polarization of the early-time HEMP for an elevated conductor ($h = 10$ m)

Probability %	$RI >$ $A \times s$	Peak $I >$ A	Δt_{pw} r.m.s. ns
50	$3,7 \times 10^{-5}$	500	74
10	$1,9 \times 10^{-4}$	1 500	127
1	$3,0 \times 10^{-4}$	4 000	75

For this evaluation a maximum effective pulse width of 127 ns is selected and is translated into a pulse width at half maximum of 88 ns by assuming an exponentially decaying waveform. This is approximated as 100 ns in table 1.

The evaluation of the rise time characteristics was more difficult for this coupling study. The 10 % – 90 % rise time was tabulated in [A.1] for both horizontal and vertical HEMP polarization. The results indicated minimum rise times of 2,3 ns and 5,1 ns for horizontal and vertical field polarization. After careful examination it was found that these rise times did not occur when the peak currents were the largest. Since the derivative itself was not tabulated in that study, additional calculations were required.

For complete vertical polarization of the IEC electric field pulse, a maximum current derivative of $2,7 \times 10^{11}$ A/s was calculated at an elevation angle of 5° for the same coupling geometry used in [A.1]. This maximum value was found from a series of calculations, and the peak value of the coupled current was maximized at the same angle. For the specified 1 % probability case, the computed 10 % – 90 % rise time is:

$$(0,8) \times (4\,000\text{ A}) / (2,7 \times 10^{11}\text{ A/s}) = 1,2 \times 10^{-8}\text{ s}$$

For the purposes of this document, a rise time of 10 ns was selected. Although it appeared likely that slower rise times would be appropriate for the more probable cases, calculations showed that the 50 % case indicated a rise time of 14,4 ns. Therefore given the relatively small difference, the same pulse rise time is used for all cases in table 1.

A.2 Buried line coupling

For buried communications or power lines, the coupled HEMP signal does not vary substantially with field polarization or angle, although the near-surface ground conductivity is of some importance. HEMP calculations using the IEC pulse were performed for a line buried at a depth of 1,0 m in three ground conductivities: 10^{-2} S/m, 10^{-3} S/m and 10^{-4} S/m. The results of 42 calculations which considered variations in angles of elevations and field polarization are summarized below in table A.2.

Tableau A.2 – Courants induits par une IEMN-HA initiale sur un conducteur enterré ($z = -1$ m)

σ_g S/m	Polarisation	Max I_{cc} A	ψ degré
10^{-2}	V	152	60
10^{-2}	H	148	90
10^{-3}	V	332	45
10^{-3}	H	267	90
10^{-4}	V	437	30
10^{-4}	H	418	90

Pour les deux conductivités les plus basses, ces valeurs sont arrondies dans le tableau 1 à la centaine d'ampères la plus proche ($10^{-3} - 300$ A, $10^{-4} - 400$ A), ce qui constitue dans les deux cas une réduction de 10 %. Pour les plus fortes valeurs de la conductivité du sol données dans le tableau A.2, le courant est arrondi à 200 A pour tenir compte des niveaux plus élevés des champs près de la surface terrestre (approprié pour les plus faibles profondeurs d'entoussissement).

En ce qui concerne les formes d'onde à utiliser, la plage de variations des temps de montée de 10 % – 90 % et les largeurs d'impulsion à mi-amplitude sont données dans le tableau A.3 ci-dessous.

Tableau A.3 – Paramètres de la forme d'onde du courant induit par une IEMN-HA initiale sur un câble enterré ($z = -1$ m)

σ_g S/m	Polarisation	Δt_r (10 % – 90 %) ns	Δt_{pw} (50 % – 50 %) ns
10^{-2}	V	26,7 – 34,7	185 – 355
10^{-2}	H	17,6 – 19,5	263 – 282
10^{-3}	V	25,0 – 29,2	198 – 398
10^{-3}	H	19,3 – 26,5	236 – 267
10^{-4}	V	27,0 – 29,8	309 – 583
10^{-4}	H	27,4 – 29,3	361 – 458

Le tableau A.4 donne la moyenne des variations obtenues dans le tableau A.3 pour chaque conductivité du sol.

Tableau A.4 – Paramètres moyens des formes d'ondes des courants induits sur un câble enterré par une IEMN-HA initiale

σ_g S/m	Δt_r (10 % – 90 %) ns	Δt_{pw} (50 % – 50 %) ns
10^{-2}	24,6	271
10^{-3}	25,0	275
10^{-4}	28,4	428

Compte tenu de ces informations, il est recommandé d'utiliser un temps de montée de 25 ns. Les variations de la largeur d'impulsion avec la conductivité du sol sont plus importantes. Une valeur de 500 ns est recommandée (de préférence à 400 ns) afin d'englober les plus grandes largeurs d'impulsion obtenues (voir tableau A.3) pour de faibles conductivités du sol. Ces valeurs sont utilisées dans le tableau 1.

A.3 Document de référence

- [A.1] Ianoz, M., Nicoara, B. et Radasky, W.A. *Modelling of an EMP Conducted Environment*, IEEE/EMC Transactions on EMC, Vol. 38, No. 3, p. 400-413, August 1996

Table A.2 – Coupled early-time HEMP currents for a buried conductor ($z = -1$ m)

σ_g S/m	Polarization	Max I_{sc} A	ψ degrees
10^{-2}	V	152	60
10^{-2}	H	148	90
10^{-3}	V	332	45
10^{-3}	H	267	90
10^{-4}	V	437	30
10^{-4}	H	418	90

For the two lower conductivities, these values are rounded to the nearest 100 A in table 1 (10^{-3} – 300 A, 10^{-4} – 400 A) which creates in both cases a 10 % reduction. For the higher conducting ground entries shown in table A.2, the current is adjusted upward to 200 A to account for the higher field levels nearer to the earth's surface (appropriate for shallower burial depths).

In terms of the waveshapes to be used, the range of 10 % – 90 % rise times and pulse widths at half maximum are given in table A.3 below.

Table A.3 – Waveform parameters for early-time HEMP buried conductor coupling ($z = -1$ m)

σ_g S/m	Polarization	Δt_r (10 % – 90 %) ns	Δt_{pw} (50 % – 50 %) ns
10^{-2}	V	26,7 – 34,7	185 – 355
10^{-2}	H	17,6 – 19,5	263 – 282
10^{-3}	V	25,0 – 29,2	198 – 398
10^{-3}	H	19,3 – 26,5	236 – 267
10^{-4}	V	27,0 – 29,8	309 – 583
10^{-4}	H	27,4 – 29,3	361 – 458

Averaging the variations provided in table A.3 for each ground conductivity, table A.4 indicates the results.

Table A.4 – Average waveform parameters for early-time HEMP buried conductor currents

σ_g S/m	Δt_r (10 % – 90 %) ns	Δt_{pw} (50 % – 50 %) ns
10^{-2}	24,6	271
10^{-3}	25,0	275
10^{-4}	28,4	428

Given this information, it is recommended that a rise time of 25 ns be used. For the pulse width, the variations are stronger with ground conductivity, and a value of 500 ns is recommended (rather than 400 ns) to cover the larger pulse widths computed (see table A.3) for low ground conductivity. These values are applied in table 1.

A.3 Reference document

- [A.1] Ianoz, M., Nicoara, B. and Radasky, W.A., *Modelling of an EMP Conducted Environment*, IEEE/EMC Transactions on EMC, Vol. 38, No. 3, p. 400-413, August 1996

Annexe B (informative)

Discussion du couplage de l'IEMN-HA intermédiaire avec des lignes longues

Les résultats présentés dans le tableau 2 ont été obtenus à partir d'une série de 70 calculs de couplages de l'IEMN-HA pour une ligne aérienne ($h = 10$ m) et pour une ligne enterrée ($h = -1$ m). L'étude portait sur les variations de la longueur de la ligne (1 km – 100 km), de l'angle de site ($0^\circ - 85^\circ$) et de la conductivité du sol (10^{-2} S/m, 10^{-3} S/m et 10^{-4} S/m). Les calculs ont été faits à l'aide d'un code résolvant dans le domaine temporel les équations des lignes de transmission; la forme d'onde utilisée était l'IEMN-HA intermédiaire définie par la CEI en supposant la polarisation verticale.

B.1 Lignes aériennes

Pour les lignes de longueur supérieure à 10 km, le maximum du courant de court-circuit crête et les caractéristiques de la forme d'onde sont donnés dans le tableau B.1.

**Tableau B.1 – Courant de court-circuit induit par une IEMN-HA intermédiaire
sur un conducteur aérien ($h = 10$ m)**

Conductivité du sol S/m	I_{pk} A	Δt_r (10 % – 90 %) μs	Δt_{pw} eff. μs
10^{-2}	138	60 – 120	700 – 2 100
10^{-3}	342	25 – 65	850 – 2 100
10^{-4}	849	30 – 65	1 000 – 2 100

Pour des lignes plus courtes, les courants crête sont plus faibles mais les caractéristiques de l'impulsion sont les mêmes. Les valeurs recommandées dans le tableau 2 pour le courant crête sont de 150 A, 350 A et 850 A. Les caractéristiques de l'impulsion peuvent être approximées à un temps de montée de 25 μs et une largeur efficace d'impulsion de 2 100 μs . Cette largeur efficace d'impulsion est convertie en largeur d'impulsion à mi-hauteur de 1 500 μs .

B.2 Lignes enterrées

Pour les lignes enterrées de longueur supérieure à 1 km, les courants crête calculés sont presque constants et varient seulement avec la conductivité du sol. Pour les lignes de longueur inférieure à 1 km, le courant crête est proportionnel à la longueur. Des variations de l'angle d'incidence pour des angles de site compris entre 0° et 85° donnent une variation inférieure à 10 %. Le tableau B.2 présente un résumé des calculs IEMN-HA.

Annex B (informative)

Discussion of intermediate-time HEMP coupling for long lines

The short-circuit results presented in table 2 were produced from a series of 70 HEMP coupling calculations for an elevated ($h = 10$ m) and buried ($h = -1$ m) conductor. The study considered variations in line length (1 km – 100 km), angle of elevation ($0^\circ - 85^\circ$) and ground conductivity (10^{-2} S/m, 10^{-3} S/m and 10^{-4} S/m). A time-dependent transmission line code was employed for the calculations, and the IEC incident intermediate-time waveform was used assuming vertical polarization.

B.1 Elevated lines

For lines greater than 10 km in length, the maximum peak short-circuit currents and waveform characteristics are shown in table B.1.

**Table B.1 – Coupled HEMP intermediate-time short-circuit currents for
an elevated conductor ($h = 10$ m)**

Ground conductivity S/m	I_{pk} A	Δt_r (10 % – 90 %) μs	Δt_{pw} r.m.s. μs
10^{-2}	138	60 – 120	700 – 2 100
10^{-3}	342	25 – 65	850 – 2 100
10^{-4}	849	30 – 65	1 000 – 2 100

For shorter lines, the peak currents are reduced but the pulse characteristics are similar. Recommended values for the peak currents are approximated as 150 A, 350 A and 850 A in table 2. The pulse characteristics can be approximated to provide a rise time of 25 μs and an effective pulse width of 2 100 μs ; this effective pulse width is converted to a pulse width at half maximum of 1 500 μs .

B.2 Buried lines

For buried lines longer than 1 km, the peak currents calculated are nearly constant, varying only with the ground conductivity. For line lengths shorter than 1 km, length scaling is appropriate. Angle of incidence variations for elevation angles from 0° to 85° indicate a variation of less than 10 %. Table B.2 presents the summary of the HEMP calculations.

Tableau B.2 – Courants de court-circuit induits par une IEMN-HA intermédiaire sur un conducteur enterré ($h = -1$ m)

Conductivité du sol S/m	I_{pk} A	Δt_r (10 % – 90 %) μs	Δt_{pw} eff. μs
10^{-2}	46	38 – 57	1 800 – 2 000
10^{-3}	147	40 – 61	1 900 – 2 100
10^{-4}	431	46 – 78	1 900 – 2 100

Les résultats ci-dessus peuvent être approximés à des valeurs crêtes de 50 A, 150 A et 450 A pour une impulsion unique de temps de montée (10 % – 90 %) de 40 μs et une largeur efficace d'impulsion de 2 100 μs . En transformant la largeur efficace en largeur à mi-hauteur (en supposant une décroissance exponentielle) on obtient une valeur de 1 455 μs ou 1 500 μs . Les caractéristiques de la forme d'onde étant similaires pour la ligne aérienne et la ligne enterrée, une seule forme d'onde est donnée dans le tableau 2; les valeurs correspondantes sont 25 μs et 1 500 μs .

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-2-10:1998

Table B.2 – Coupled HEMP intermediate-time short-circuit currents for a buried conductor ($h = -1$ m)

Ground conductivity S/m	I_{pk} A	Δt_r (10 % – 90 %) μs	Δt_{pw} r.m.s. μs
10^{-2}	46	38 – 57	1 800 – 2 000
10^{-3}	147	40 – 61	1 900 – 2 100
10^{-4}	431	46 – 78	1 900 – 2 100

The results shown above can be approximated for peak values of 50 A, 150 A and 450 A by a single pulse waveform with a rise time (10 % – 90 %) of 40 μs and an effective pulse width of 2 100 μs . Converting the effective pulse width to a half width (assuming an exponential decay) yields a value of 1 455 μs or 1 500 μs . Because the waveform characteristics are similar for both elevated and buried lines, only a single waveform is required in table 2, and the values of 25 μs and 1 500 μs are used.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-2-10:1998

Annexe C (informative)

Réponses des antennes simples à l'environnement IEMN-HA initial défini par la CEI

C.1 Introduction

Il est utile de disposer d'indications sur les réponses possibles de divers types d'antennes pour comprendre les exigences applicables à la protection des systèmes civils contre les effets d'une impulsion électromagnétique à haute altitude (IEMN-HA). L'analyse des antennes est une discipline aboutie disposant de nombreux modèles de calcul différents utilisables pour la détermination des réponses typiques [C.1]*. L'analyse des antennes, cependant, est souvent effectuée sur la seule gamme de fréquences intrabande (c'est-à-dire opérationnelle) et cela ne présente pas d'intérêt particulier pour l'obtention de la réponse transitoire d'une antenne qu'il faut analyser sur une très large bande.

De plus, dans le cas de l'analyse de la réponse transitoire d'une antenne, les résultats sont souvent présentés sous forme d'une onde transitoire correspondant à un nombre limité d'angles d'incidence d'excitation. On ne dispose habituellement pas, pour cette raison, d'une connaissance complète du comportement de l'antenne et de ses réponses typiques.

Un des remèdes à cette situation consiste à effectuer un grand nombre de calculs individuels de transitoire pour chaque antenne correspondant à différents angles d'incidence de l'IEMN-HA et, ensuite, à présenter les résultats de la réponse de l'antenne (par exemple la valeur de crête de la tension en circuit ouvert de l'antenne) sous forme d'une distribution cumulée des probabilités (DCP) qui fournit une indication de la probabilité de réponse de l'antenne au-delà d'une valeur spécifiée. Dans cette norme, les réponses de deux antennes différentes sont déterminées dans un environnement IEMN-HA initial défini par la CEI. Il s'agit d'une antenne verticale unipolaire qu'on suppose alimentée par rapport à la terre et d'un dipôle horizontal situé au-dessus de la terre. Dans chacun de ces deux cas, les valeurs observées sont les valeurs de crête de la tension en circuit ouvert (V_{CO}), le courant de court-circuit (I_{CC}), la tension crête à travers une charge de 50Ω reliée à l'entrée de l'antenne (V_L) et le courant crête correspondant passant à travers la charge de 50Ω (I_L).

C.2 L'environnement IEMN-HA initial défini par la CEI

L'IEMN-HA, selon la description de la CEI 61000-2-9, est représenté par une onde plane (voir figure C.1) incidente sur un système situé au sol ou à son voisinage, avec un angle vertical de site Ψ et un angle d'azimut d'incidence ϕ mesurés par rapport à une direction de référence quelconque pratique (l'axe x).

Du fait de la géométrie sphérique de la terre, seule une zone limitée de la surface terrestre est directement éclairée par les champs IEMN-HA. Comme le montre la figure C.2, la région éclairée de la terre est définie par le rayon tangent R_t , donné par l'expression

$$R_t = R_e \arccos \left(\frac{R_e}{R_e + HOB} \right) \quad (C.1)$$

où HOB est la hauteur de l'explosion et R_e est le rayon de la terre (6 371,2 km). On obtient une approximation de cette expression, pour $HOB < 500$ km, de

$$R_t \approx 110 \sqrt{HOB} \quad (\text{unités en km}) \quad (C.2)$$

* Les chiffres entre crochets renvoient aux documents de référence donnés à l'article C.6.

Annex C (informative)

Responses of simple linear antennas to the IEC early-time HEMP environment

C.1 Introduction

For the understanding of the protection requirements of civilian systems against the effects of a high-altitude electromagnetic pulse (HEMP), it is useful to have an indication of the possible responses of various types of antennas. The analysis of antennas is a mature discipline, with many different calculational models available for use in determining typical responses [C.1]*. However, the analysis of antennas is frequently conducted only in the in-band (i.e. the operational) frequency range, and this is not particularly useful for obtaining the transient response of an antenna, in which a very wide-band analysis is required.

Furthermore, when a transient response of an antenna is conducted, the results are often presented in the form of a transient waveform for a limited number of angles of incidence of the excitation. Thus, a global understanding of the behaviour of the antenna and its typical responses usually is not available.

One way of remedying this situation is to perform a large number of individual transient antenna calculations for different angles of incidence of the HEMP and then to present the results of the antenna response (e.g., the peak value of the open-circuit voltage of the antenna) in the form of a cumulative probability distribution (CPD) which provides an indication of the probability of a response of the antenna exceeding a specified value. In this standard, the responses of two different antennas are determined for the IEC early-time HEMP environment. The antennas are a vertical monopole antenna which is assumed to be fed against the earth, and a horizontal dipole antenna which is located above the earth. In each of these cases, the observables considered are the peak values of the open-circuit voltage (V_{oc}), the short-circuit current (I_{sc}), the peak voltage across a 50 Ω load connected to the input of the antenna (V_L), and the corresponding peak current flowing through the 50 Ω load (I_L).

C.2 The IEC early-time HEMP environment

As described in IEC 61000-2-9, the HEMP is represented by an incident plane wave shown in figure C.1 which is incident on a system on or near the ground with a vertical angle of elevation ψ and an azimuthal angle of incidence ϕ , which is measured with respect to some convenient reference direction (the x-axis).

Because of the spherical earth geometry, only a limited area on the earth's surface is directly illuminated by the HEMP fields. As shown in figure C.2, the illuminated region on the earth is defined by the tangent radius R_t , which is given by the expression

$$R_t = R_e \arccos \left(\frac{R_e}{R_e + HOB} \right) \quad (C.1)$$

where HOB is the height of the burst, and R_e is the earth radius (6 371,2 km). For $HOB < 500$ km, this expression is approximated by

$$R_t \approx 110\sqrt{HOB} \quad \text{units in km} \quad (C.2)$$

* References in square brackets refer to the reference documents in C.6.

Nous supposons ici que l'explosion se situe à une altitude de 100 km. Cela implique un rayon tangent $R_t \approx 1\,100$ km.

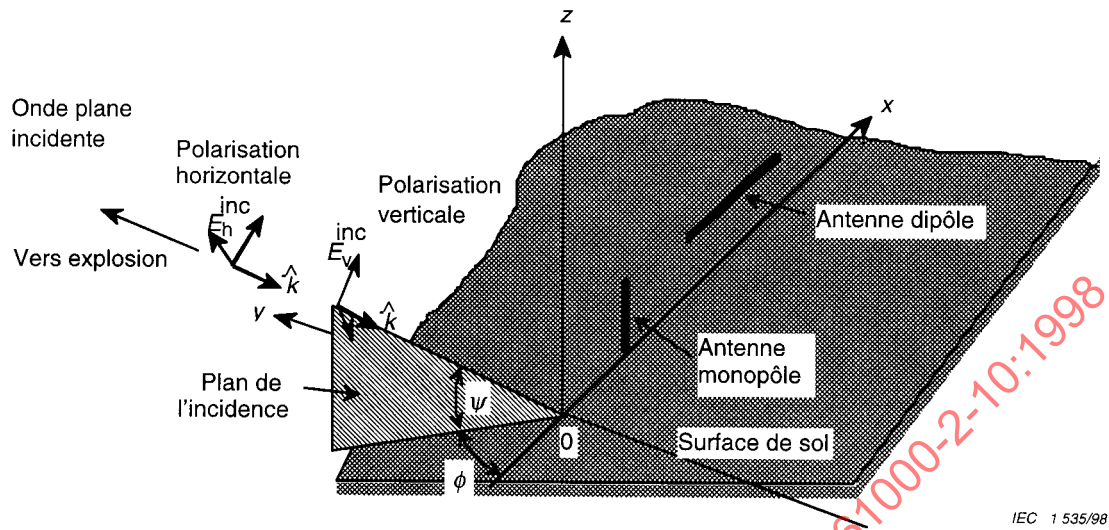


Figure C.1 – Champ incident de l'IEMN-HA

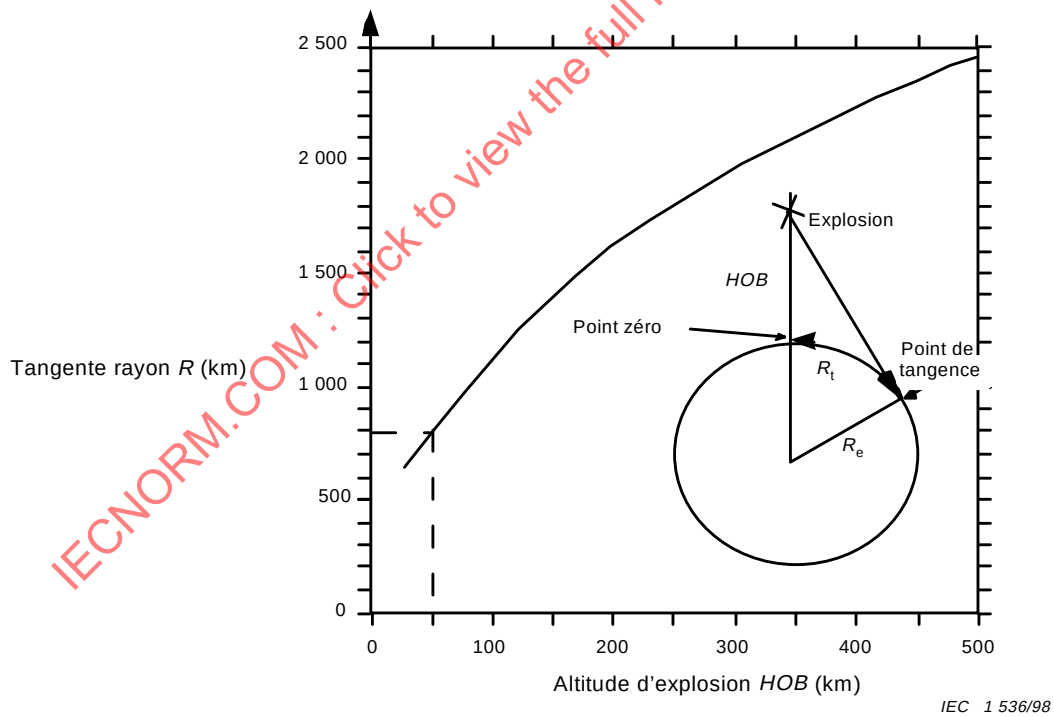


Figure C.2 – Rayon de tangence R_t de l'IEMN-HA définissant la région illuminée en fonction de l'altitude d'explosion (HOB)

For the present study, we assume that the burst is located at a height of 100 km. This implies that the tangent radius is $R_t \approx 1\,100$ km.

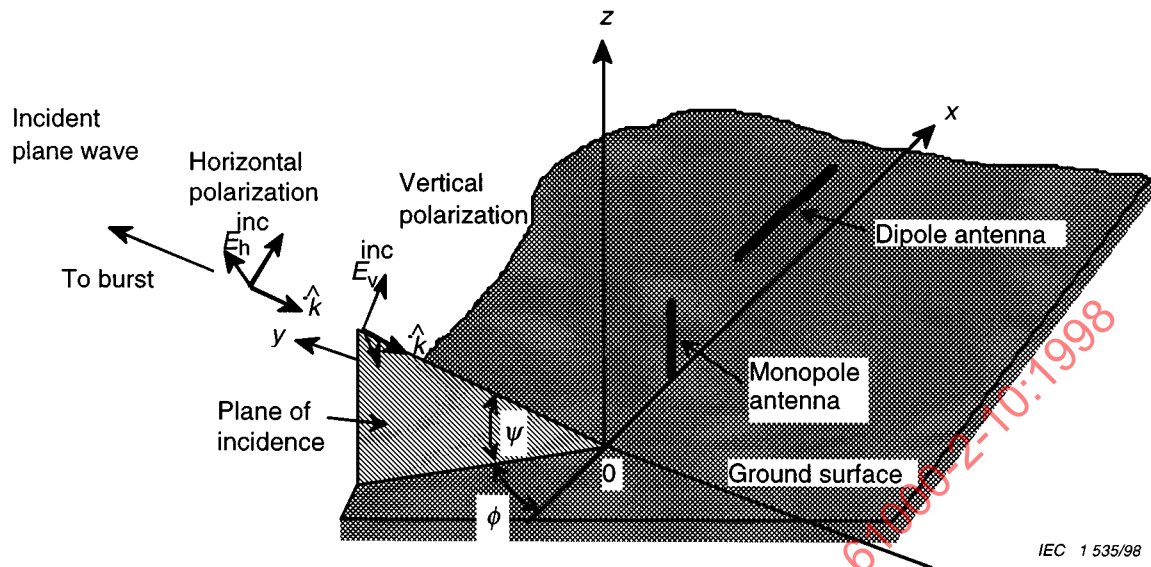


Figure C.1 – Illustration of the incident HEMP field

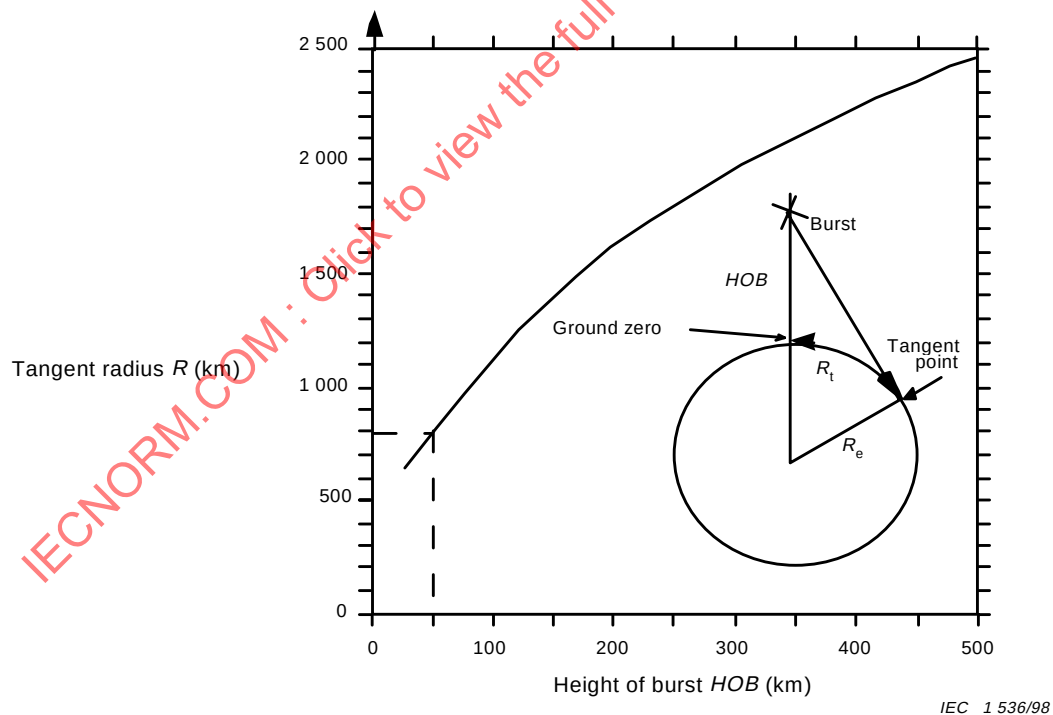


Figure C.2 – The HEMP tangent radius R_t defining the illuminated region, shown as a function of burst height (HOB)

En dehors de la région éclairée, les champs IEMN-HA sont supposés égaux à zéro. Dans cette région, on suppose que la forme temporelle du champ incident est donnée par une onde double exponentielle de forme

$$E^{\text{inc}}(t) = 65\,000 \left(e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-6 \times 10^8 t} \right) t > 0 \text{ (V/m)} \quad (\text{C.3})$$

et qu'il se décompose en composantes verticalement et horizontalement polarisées, comme le montre la figure C.1.

Comme indiqué dans la CEI 61000-2-9, la division du champ IEMN-HA incident en composantes verticale et horizontale dépend de l'angle d'inclinaison du champ géomagnétique θ_{dip} . Ce paramètre varie selon les emplacements de l'explosion et de l'observateur, on le traite donc, comme une variable indépendante et on calcule les réponses pour diverses valeurs de θ_{dip} . Les composantes verticale et horizontale du champ incident sont notées E_v^{inc} et E_h^{inc} ; elles sont données en termes de fractions f_v et f_h car $E_v^{\text{inc}} = f_v E^{\text{inc}}$ et $E_h^{\text{inc}} = f_h E^{\text{inc}}$. Nous avons utilisé ici une approximation des fractions de polarisation à leurs valeurs maximales, $f_v = \cos \theta_{\text{dip}}$ et $f_h = \sin \theta_{\text{dip}}$.

Comme le montre la figure C.1, les deux antennes étudiées sont une antenne unipolaire verticale montée sur la terre et une antenne dipôle horizontale déployée parallèlement à la terre. Le calcul du courant induit dans ces antennes demande qu'on connaisse le champ E d'excitation tangentiel le long des antennes. Ce champ se compose du champ IEMN-HA incident plus le champ réfléchi par le sol. En ce qui concerne le monopôle vertical, le champ d'excitation est la composante z du champ E , qui, à toute altitude z , correspond à [C.2].

$$E_z = E^{\text{inc}} \cos \theta_{\text{dip}} \cos \psi (1 - R_v e^{-jk 2 z \sin \psi}) \quad (\text{C.4})$$

où R_v est le coefficient de réflexion de Fresnel pour un champ polarisé verticalement donné par [C.3]:

$$R_v = \frac{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) \sin \psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) \sin \psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}} \quad (\text{C.5})$$

où σ_g est la conductivité électrique du sol, ϵ_r est la constante diélectrique relative du sol et ϵ_0 est la constante diélectrique en espace libre. Il faut noter que pour ce champ vertical, seule la composante polarisée verticalement du champ IEMN-HA incident contribue à la réponse.

En ce qui concerne l'antenne horizontale, supposée parallèle à l'axe x , la composante du champ E_x à une altitude h au-dessus du sol sert d'excitation. Ce champ s'exprime en termes de composantes de l'onde polarisées verticalement et horizontalement, c'est-à-dire [C.2]:

$$E_x = E^{\text{inc}} e^{-jkx \cos \psi \cos \phi} \left[\cos \theta_{\text{dip}} \sin \psi \cos \phi (1 - R_v e^{-jk 2 h \sin \psi}) + \sin \theta_{\text{dip}} \sin \phi (1 + R_h e^{-jk 2 h \sin \psi}) \right] \quad (\text{C.6})$$

où la réflexion de Fresnel pour le champ horizontal R_h a été introduite. Cela est également indiqué en [C.3] par:

$$R_h = \frac{\sin \psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}{\sin \psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega \epsilon_r \epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}} \quad (\text{C.7})$$

Outside the illuminated region, the HEMP fields are taken to be zero. Within this region, the incident field is assumed to have a time history given by a double exponential waveform of the form

$$E^{\text{inc}}(t) = 65\,000 \left(e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-6 \times 10^8 t} \right) t > 0 \text{ (V/m)} \quad (\text{C.3})$$

and is decomposed into vertically and horizontally polarized components, as indicated in figure C.1.

As discussed in IEC 61000-2-9, the division of the incident HEMP field into vertical and horizontal components depends on the dip angle of the geomagnetic field θ_{dip} . This parameter varies with the locations of the burst and observer, and hence, it is treated as an independent variable in this study: responses for different values of θ_{dip} are calculated. The vertical and horizontal components of the incident field are denoted by E_v^{inc} and E_h^{inc} and are given in terms of the polarization fractions f_v and f_h , as $E_v^{\text{inc}} = f_v E^{\text{inc}}$ and $E_h^{\text{inc}} = f_h E^{\text{inc}}$. For this study we have approximated the polarization fractions at their maximum values, $f_v = \cos \theta_{\text{dip}}$ and $f_h = \sin \theta_{\text{dip}}$.

As shown in figure C.1, the two antennas considered are a vertical monopole antenna mounted on the earth, and a horizontal dipole antenna extended parallel to the earth. To compute the induced current in these antennas, it is necessary to know the tangential excitation E -field along the antennas. This field consists of the incident HEMP field, plus the ground-reflected field. For the vertical monopole, the excitation field is z -component of the E -field, which at any height z , is given as [C.2].

$$E_z = E^{\text{inc}} \cos \theta_{\text{dip}} \cos \psi (1 - R_v e^{-jk2z \sin \psi}) \quad (\text{C.4})$$

where R_v is the Fresnel reflection coefficient for a vertically polarized field, given by [C.3]:

$$R_v = \frac{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0} \right) \sin \psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}{\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0} \right) \sin \psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}} \quad (\text{C.5})$$

where σ_g is the electrical conductivity of the ground, ϵ_r is the relative permittivity of the ground and ϵ_0 is the free-space permittivity. Notice that for this vertical field, only the vertically polarized component of the incident HEMP field contributes to the response.

For the horizontal antenna, which is assumed to be parallel to the x -axis, the E_x field component at a height h over the ground is required as the excitation. This field is expressed in terms of both the vertically polarized and horizontally polarized waveform components as [C.2]:

$$E_x = E^{\text{inc}} e^{-jkx \cos \psi \cos \phi} \left[\cos \theta_{\text{dip}} \sin \psi \cos \phi (1 - R_v e^{-jk2h \sin \psi}) + \sin \theta_{\text{dip}} \sin \phi (1 + R_h e^{-jk2h \sin \psi}) \right] \quad (\text{C.6})$$

where the Fresnel reflection for the horizontal field, R_h , has been introduced. This is also given in [C.3] as

$$R_h = \frac{\sin \psi - \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}}{\sin \psi + \left[\epsilon_r \left(1 + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_r\epsilon_0} \right) - \cos^2 \psi \right]^{1/2}} \quad (\text{C.7})$$

C.3 Evaluation des réponses d'antenne

Etant donné les champs d'excitation tangentiels, voir équations (C.4) et (C.5), joints à une spécification de la longueur d'antenne, du rayon et de l'impédance de charge, les courants induits sur une antenne donnée et dans les charges peuvent alors être calculés en appliquant la méthode des moments [C.4]. Il s'agit d'une procédure numérique qui résout l'équation intégrale fonction de la fréquence concernant le courant. Une fois calculé le spectre de la réponse dans le domaine fréquentiel, on calcule la réponse transitoire à l'aide de la transformée rapide de Fourier (FFT). Voir [C.5] et [C.6] pour les détails de ces calculs.

C.3.1 L'antenne unipolaire

La figure C.3 illustre la géométrie de l'antenne unipolaire verticale utilisée pour cette étude. Comme noté dans l'équation (C.4), le champ d'excitation est indépendant de l'angle d'azimut ϕ . Par conséquent, seul l'angle vertical de site ψ entre dans ce calcul. L'antenne unipolaire a une longueur L , un rayon a et une charge de 50Ω située à la base de l'antenne est reliée au sol. Il est usuel, pour de telles antennes, de spécifier le rapport longueur-rayon par un paramètre Ω_0 , défini par

$$\Omega_0 = 2 \ln \left(\frac{2L}{a} \right) \quad (\text{C.8})$$

Le paramètre $\Omega_0 = 8$, correspondant à un rapport L/a de 27,3, représente, pour le présent calcul, une antenne d'épaisseur raisonnable.

La terre, pour ces calculs, est supposée avoir une conductivité $\sigma_0 = 0,01 \text{ S/m}$ et une constante diélectrique relative $\epsilon_r = 10$, c'est-à-dire des valeurs typiques voir [C.3].

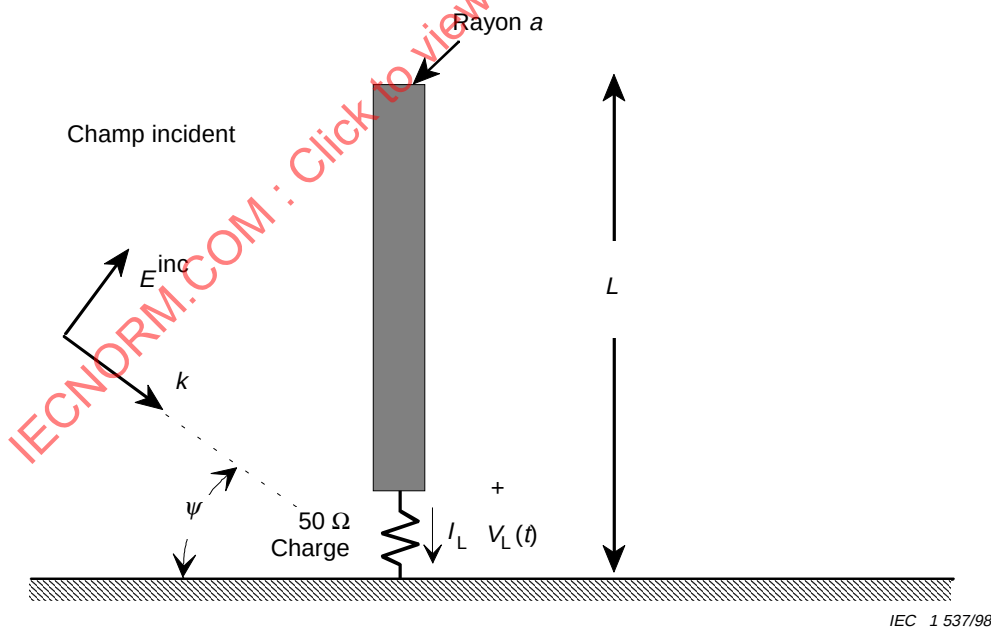


Figure C.3 – Géométrie du monopôle

C.3 Evaluation of the antenna responses

Given the tangential excitation fields of equations (C.4) and (C.6), together with a specification of the antenna length, radius and load impedance, the induced currents on a given antenna and in the loads can be computed by using the method of moments [C.4]. This is a numerical procedure which solves the frequency-dependent integral equation for the current. Once the frequency domain spectrum of the response is computed, the transient response is computed using the fast Fourier transform (FFT). Details of such calculations are presented in references [C.5] and [C.6].

C.3.1 The monopole antenna

Figure C.3 illustrates the geometry of the vertical monopole used in this study. As noted in equation (C.4), the excitation field is independent of the azimuthal angle ϕ . Consequently, only the vertical angle of elevation ψ enters into the calculation. The monopole has a length L , a radius a , and has a $50\ \Omega$ load at the base of the antenna connected to the ground. For such antennas, it is common to specify the length to radius ratio through a parameter Ω_0 , defined as

$$\Omega_0 = 2 \ln \left(\frac{2L}{a} \right) \quad (\text{C.8})$$

For the present calculation, the parameter $\Omega_0 = 8$, which corresponds to an L/a ratio of 27,3, represents a reasonably thick antenna.

In these calculations, the earth is taken to have a conductivity $\sigma_g = 0,01\ \text{S/m}$ and a relative permittivity $\epsilon_r = 10$, which are typical values according to [C.3].

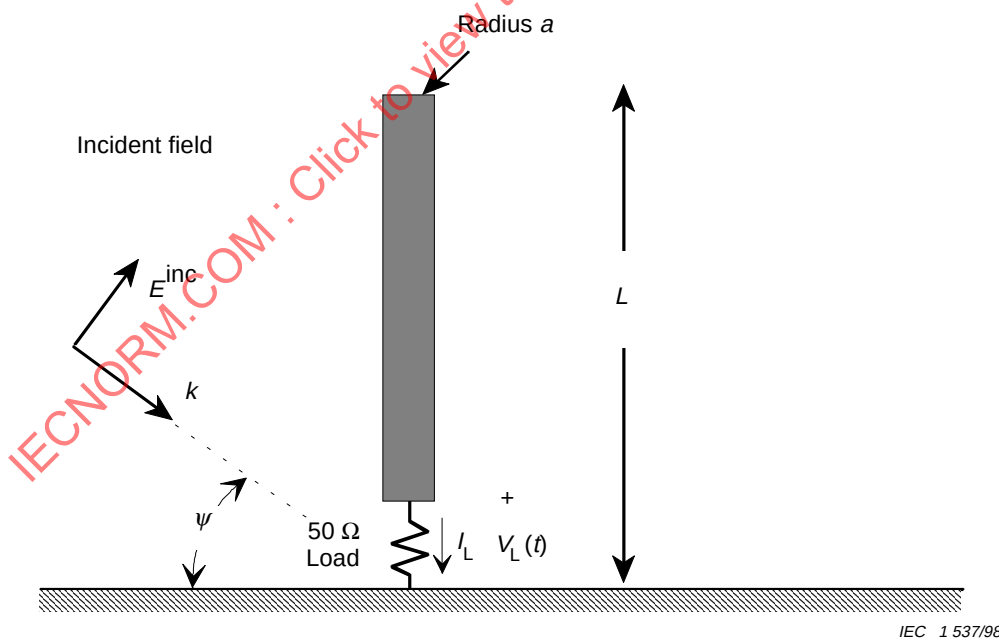


Figure C.3 – Geometry of the monopole antenna.

Pour cette antenne (de même que pour le dipôle présenté en C.3.2), on a calculé quatre quantités: la tension en circuit ouvert (V_{co}) à «l'intervalle» source situé à la base de l'antenne, le courant de court-circuit (I_{cc}) passant à la base de l'antenne, la tension de charge (V_L) à travers l'impédance à l'entrée de l'antenne et le courant de charge correspondant (I_L). Toutes ces quantités sont reliées par l'équation intégrale du courant d'antenne, selon la description de Harrington [C.4]. Du fait de la relation simple v-i au niveau de l'impédance de charge, la tension de charge et le courant de charge sont reliés de manière évidente par $V_L = Z_{L/L}$. La valeur de crête des réponses transitoires revêt dans ce cas un intérêt tout particulier; il s'agit des quantités réellement obtenues et conservées durant la progression des calculs.

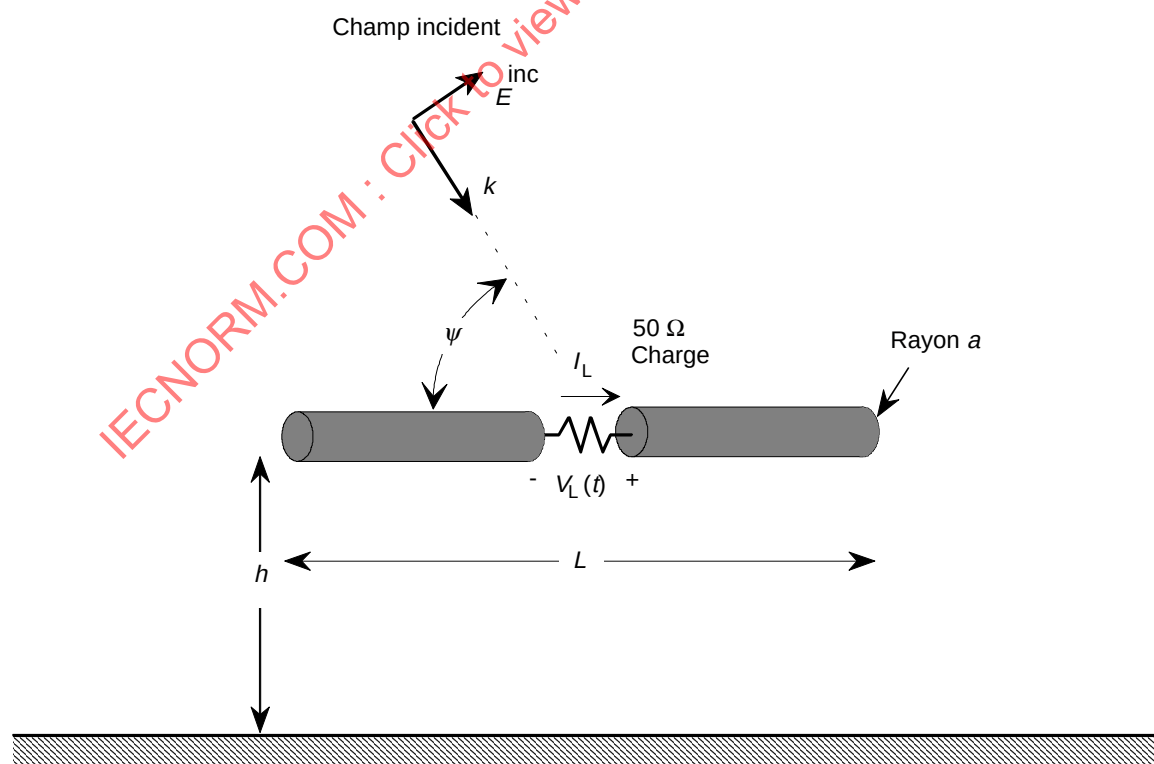
La détermination des DCP pour les valeurs observables précédentes implique de nombreux calculs de réponses d'antenne si un point d'observation est choisi au hasard dans la région d'exposition. Ainsi, 3 000 emplacements d'observation distincts ont été traités, et, pour chaque emplacement, on utilise la solution de l'équation intégrale pour connaître les valeurs observables. Cela conduit à une répartition des réponses et, en fin de compte, à une DCP qui indique la probabilité d'une réponse particulière dépassant une valeur spécifiée.

C.3.2 L'antenne dipôle

La figure C.4 montre la géométrie de l'antenne dipôle horizontale. La fonction excitation, pour cette antenne, dépend des angles ϕ et ψ d'incidence ainsi que des deux composantes de polarisation du champ incident. La longueur totale, pour cette antenne, est notée L , le rayon est a et l'impédance de charge est là encore égale à 50Ω . Le rapport longueur-rayon dans ce cas est défini par

$$\Omega_0 = 2 \ln \left(\frac{L}{a} \right)$$

où le paramètre $\Omega_0 = 8$ a de nouveau été retenu. Cela correspond à un rapport L/a de 54,6.



IEC 1 538/98

Figure C.4 – Géométrie de l'antenne dipôle

For this antenna (as well as for the dipole to be discussed in C.3.2, four quantities have been calculated: the open-circuit voltage (V_{oc}) at the source “gap” located at the base of the antenna, the short-circuit current (I_{sc}) flowing at the base of the antenna, the loaded voltage (V_L) across the impedance at the input of the antenna, and the corresponding load current (I_L). All of these quantities are related by the integral equation for the antenna current as described by Harrington [C.4]. Because of the simple v-i relationship at the load impedance, the load voltage and load current are related trivially by $V_L = Z_L I_L$. Of special interest here is the peak value of the transient responses, and these are the quantities actually extracted and retained as the calculation progresses.

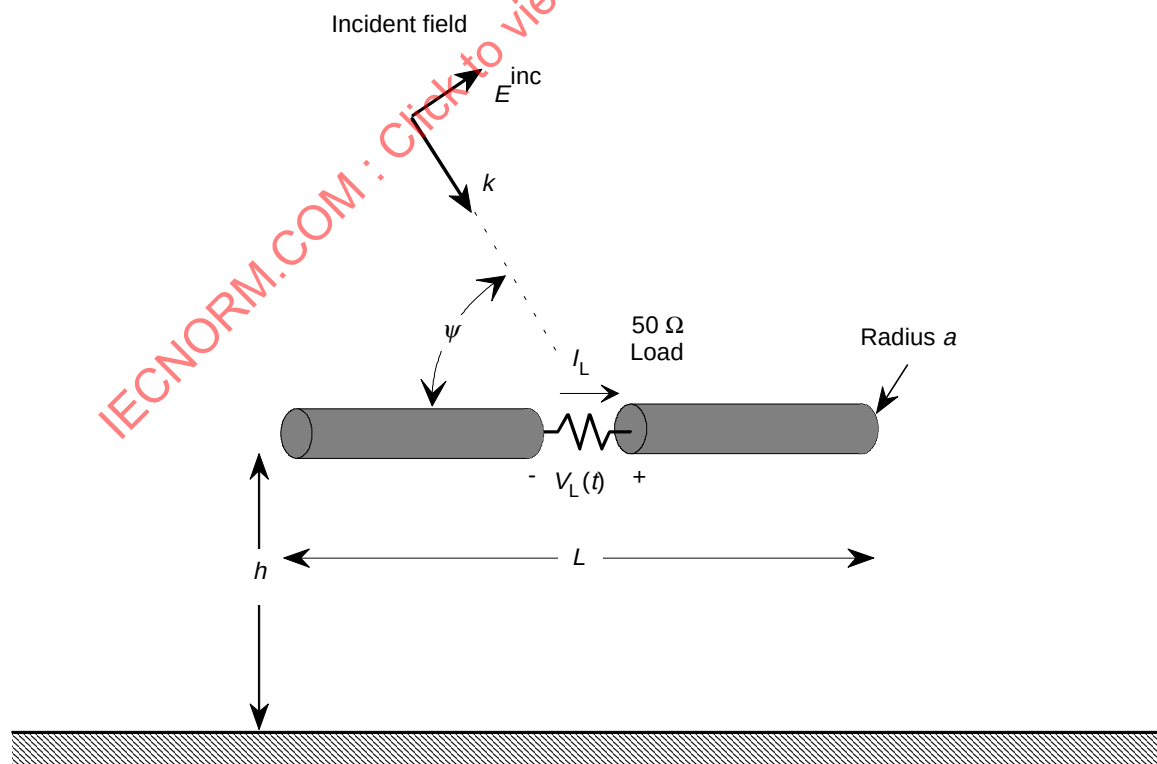
The determination of the CPDs for the above observables involves performing a large number of calculations of the antenna responses as an observation point is chosen at random in the illumination region. Typically, 3 000 distinct observation locations have been used and for each location, the solution of the integral equation is used to provide a knowledge of the observable values. This leads to a distribution of responses and ultimately to the CPD, which provides the probability of a particular response exceeding a specified value.

C.3.2 The dipole antenna

The geometry of the horizontal dipole antenna is shown in figure C.4. The excitation function for this antenna depends on both the ϕ and ψ angles of incidence, as well as on both polarization components of the incident field. For this antenna, the total length is denoted by L , the radius is a , and the load impedance is again chosen to be $50\ \Omega$. The length to radius ratio for this case is defined as

$$\Omega_0 = 2 \ln \left(\frac{L}{a} \right)$$

where again the parameter $\Omega_0 = 8$ has been used. This corresponds to an L/a ratio of 54,6.



IEC 1538/98

Figure C.4 – Geometry of the dipole antenna

La présence du plan du sol a exigé un autre paramètre pour décrire la géométrie, plus précisément la hauteur de l'antenne au-dessus du sol, h . Comme indiqué par l'équation (C.6), l'excitation de l'antenne provient du champ incident augmenté de la contribution apportée par la réflexion du sol. L'excitation réfléchie du sol, en principe, tend à induire une réponse d'antenne qui annule la réponse induite par le champ incident. Cependant, cet effet d'annulation arrive habituellement sur l'antenne après le premier pic de la réponse. Ainsi, le champ réfléchi par la terre n'a souvent pas d'impact sur les valeurs de crête de la réponse pour les antennes situées à hauteur supérieure à $L/2$ au-dessus du sol. Par conséquent, on obtient une bonne estimation du pire cas de réponse de l'antenne en négligeant complètement la réflexion du sol et en traitant l'antenne comme si elle se situait dans l'espace libre. Cela est certainement justifié car les antennes de ce type sont généralement éloignées de la terre pour optimiser leurs caractéristiques opérationnelles dans la bande.

Les calculs des CPD des réponses d'antenne dipôle sont effectués de la même manière que pour l'antenne unipolaire, sauf que les variations de l'angle ϕ doivent également être prises en compte. Cela est obtenu en supposant que, pour une direction fixe de l'antenne (le long de l'axe x), l'angle ϕ peut prendre une valeur quelconque entre 0° et 360° avec la même probabilité. Pour ces calculs, 3 000 emplacements de l'antenne dans la région éclairée ont été utilisés au total, 500 valeurs de ϕ étant en tout appliquées à chaque emplacement de l'antenne. Cela a demandé l'examen de 1,5 million de cas de couplage au total afin de générer des courbes de probabilité.

C.4 Résultats calculés

La procédure d'analyse et les modèles numériques précédents ont servi au calcul des DCP de quatre cas de réponses d'antenne à un environnement IEMN-HA initial défini par la CEI, cela pour les deux types d'antenne. Quatre valeurs différentes de la longueur L ont été utilisées ici: $L = 1$ m, 3 m, 10 m et 100 m aussi bien pour l'antenne unipolaire que pour le dipôle. Les résultats sont donnés dans cet article.

Les DCP calculés par les courants et tensions de charge de l'antenne unipolaire verticale sont présentés par les figures C.5, C.6, C.7 et C.8, pour les quatre longueurs de l'antenne unipolaire.

De la même manière, les DCP correspondant aux courants et tensions de charge de l'antenne horizontale dipôle sont présentés par les figures C.9, C.10, C.11 et C.12 pour les quatre longueurs différentes du dipôle.

C.5 Récapitulatif des résultats

Les courbes de probabilité des figures C.5 à C.12 donnent une indication significative du comportement éventuel de l'antenne soumise à une excitation IEMN-HA. Cependant, on ne demande souvent que les réponses correspondant aux niveaux de probabilité cumulée de 50 %, 10 % et 1 %. Le présente norme s'y réfère sous le nom de «niveaux de sévérité» 50 %, 90 % et 99 % ce qui correspond au pourcentage des cas d'antennes ayant une réponse inférieure au niveau de réponse indiqué. Ces valeurs peuvent se trouver dans les tableaux 3 à 9.

Tous ces résultats ont été calculés pour un paramètre d'antenne $\Omega_0 = 8$ correspondant à un rapport L/a de 27,3 pour le monopole et à un rapport L/a de 54,6 pour le dipôle. Les réponses de l'antenne changent si on souhaite un autre rapport d'aspect de cette antenne. La figure C.13 présente les facteurs multiplicatifs de correction, normalisés à l'unité pour $\Omega_0 = 8$, applicables aux données de cette annexe et des tableaux 4 à 9 pour obtenir des informations concernant d'autres antennes.

The presence of the ground plane has caused another parameter to be needed in describing the geometry – namely the height of the antenna over the ground, h . As noted in equation (C.6), the excitation of the antenna arises from the incident field plus a ground-reflected contribution. Typically, the ground-reflected excitation tends to induce an antenna response that cancels the response induced by the incident field. However, this cancelling excitation contribution usually arrives at the antenna after the first peak in the response has occurred. Thus, the earth-reflected field often has no impact on the peak values of the response for antennas that are higher than $L/2$ over the ground. Therefore, a good estimate of the worst case response of the antenna is provided by neglecting the ground reflection completely, and treating the antenna as if it were in free-space. This is certainly reasonable, as these types of antennas are usually located far from the earth in order to optimize their in-band operational characteristics.

Calculations for the CPDs of the dipole antenna responses are carried out in the same way as for the monopole antenna, except that the variations of the angle ϕ shall also be taken into account. This is done by assuming that for a fixed antenna direction (along the x-axis), the angle ϕ can take any value between 0° and 360° with equal probability. For these calculations, a total of 3 000 antenna locations within the illuminated region were used, with a total of 500 values of ϕ being used for each antenna location. This required a total of 1,5 million coupling cases to be considered to generate the probability curves.

C.4 Calculated results

Using the previously discussed analysis procedure and numerical models, the CPDs for the four antenna responses to the IEC early-time HEMP environment have been calculated for both antenna types. For this study, four different values of length L have been used: $L = 1$ m, 3 m, 10 m and 100 m for both the monopole and the dipole antennas. These results are presented in this clause.

The computed CPDs for the vertical monopole antenna load currents and voltages are presented in figures C.5, C.6, C.7, and C.8, for the four different monopole lengths.

Similarly, the CPDs for the horizontal dipole antenna load currents and voltages are presented in figures C.9, C.10, C.11, and C.12, for the four different dipole lengths.

C.5 Summary of results

The probability curves of figures C.5 through C.12 provide significant detail as to the possible antenna behaviour subject to HEMP excitation. Frequently, however, only the responses for the 50 %, 10 % and 1 % cumulative probability levels are desired. These are referred to in this standard as the 50 %, 90 % and 99 % “severity levels”, respectively, which indicates the percentage of antenna cases having a response less than the indicated response level. These values can be found in tables 3 to 9.

All of these results have been calculated for an antenna parameter $\Omega_0 = 8$, which corresponds to an L/a ratio of 27,3 for the monopole and an L/a ratio of 54,6 for the dipole. If a different aspect ratio for the antenna is desired, the antenna responses would change. Figure C.13 presents multiplicative correction factors, normalized to unity for $\Omega_0 = 8$, which may be applied to the data of this annex, and tables 4 to 9, to yield data for different antennas.

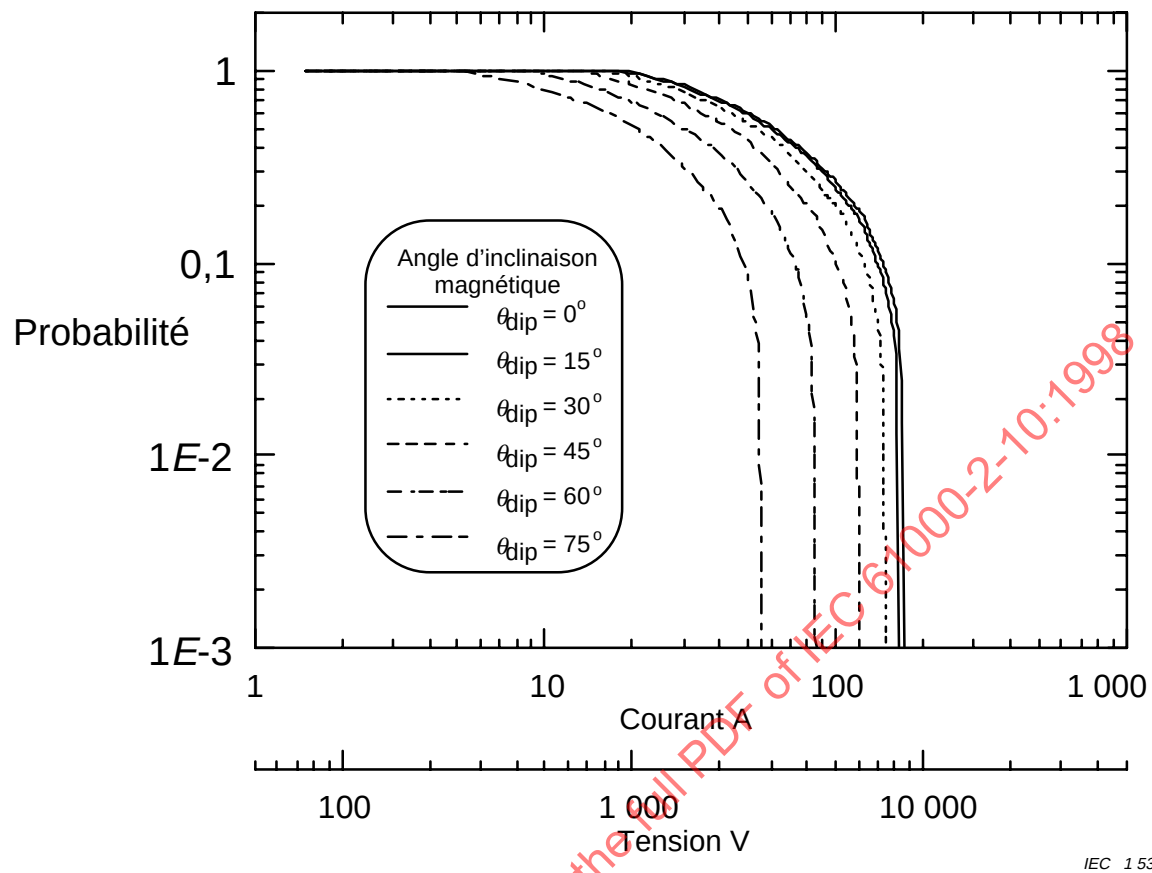
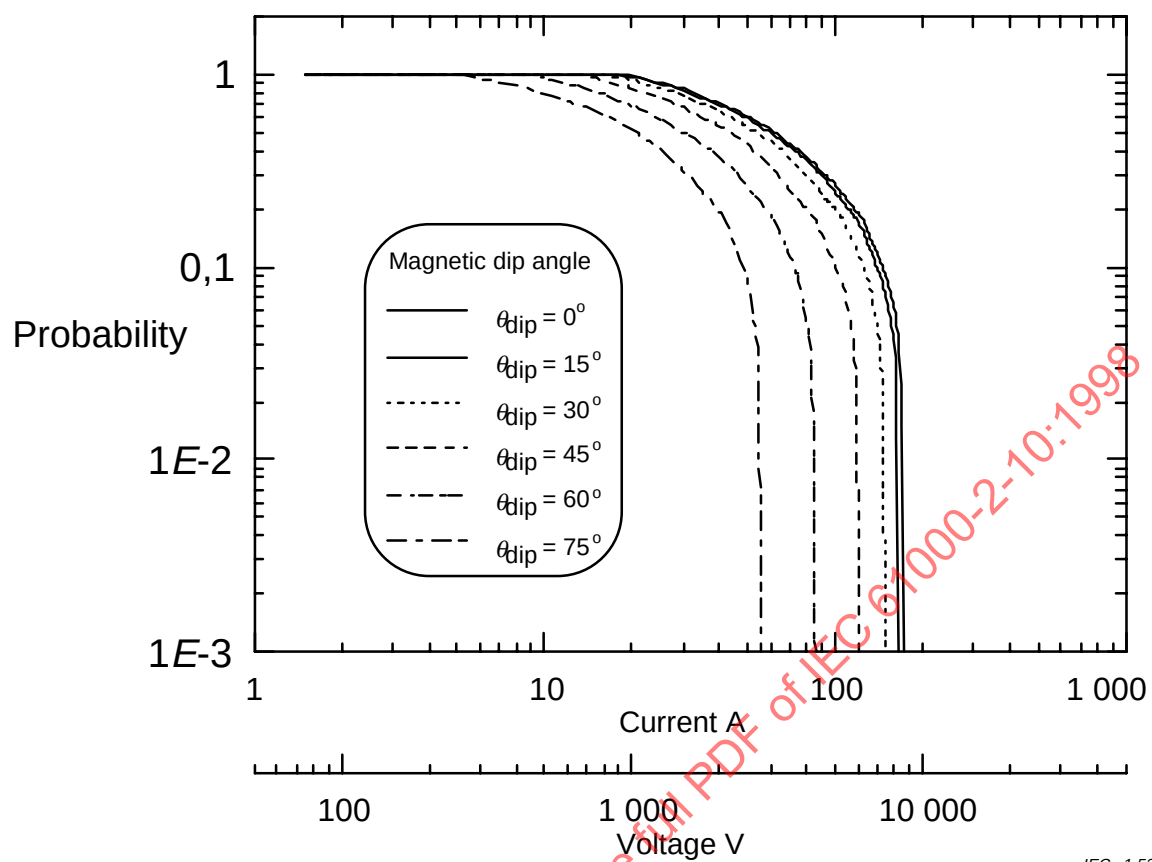
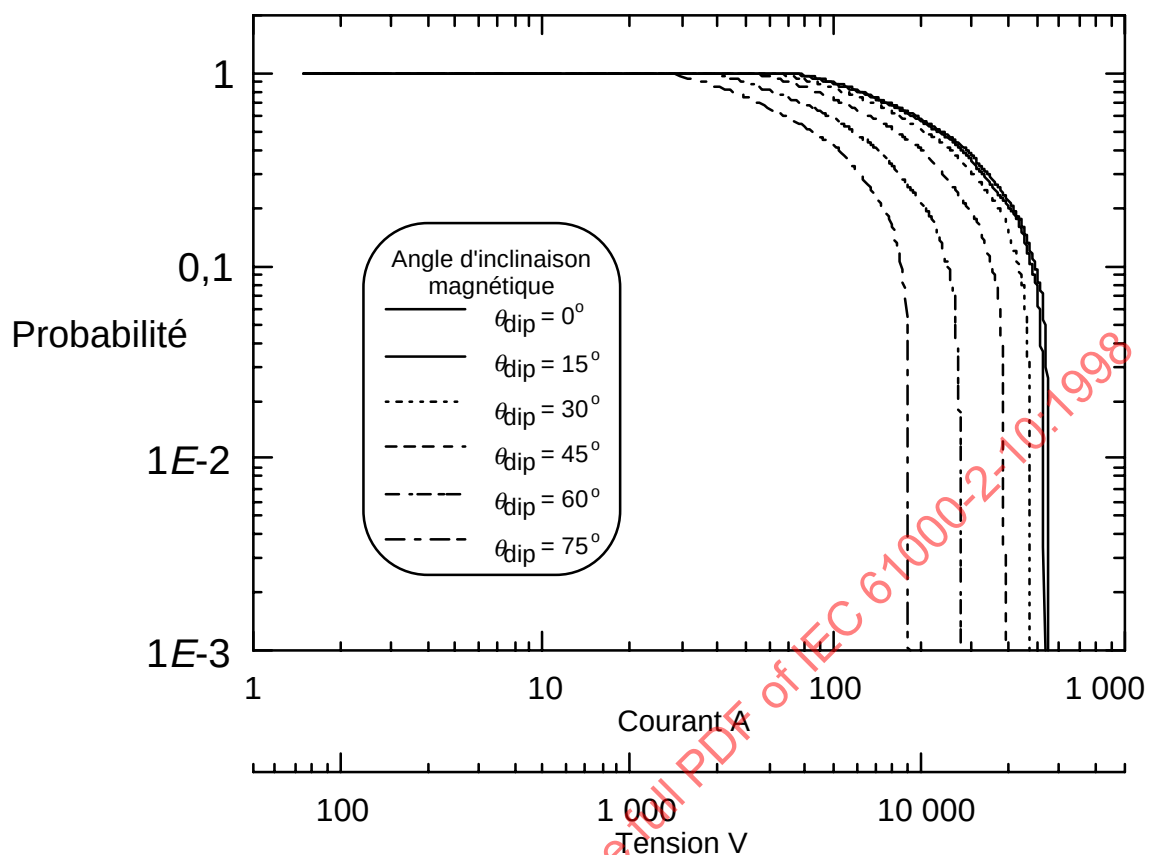


Figure C.5 – Distributions cumulées de probabilité des réponses crêtes des courants et des tensions de charge d'un monopôle vertical de 1 m



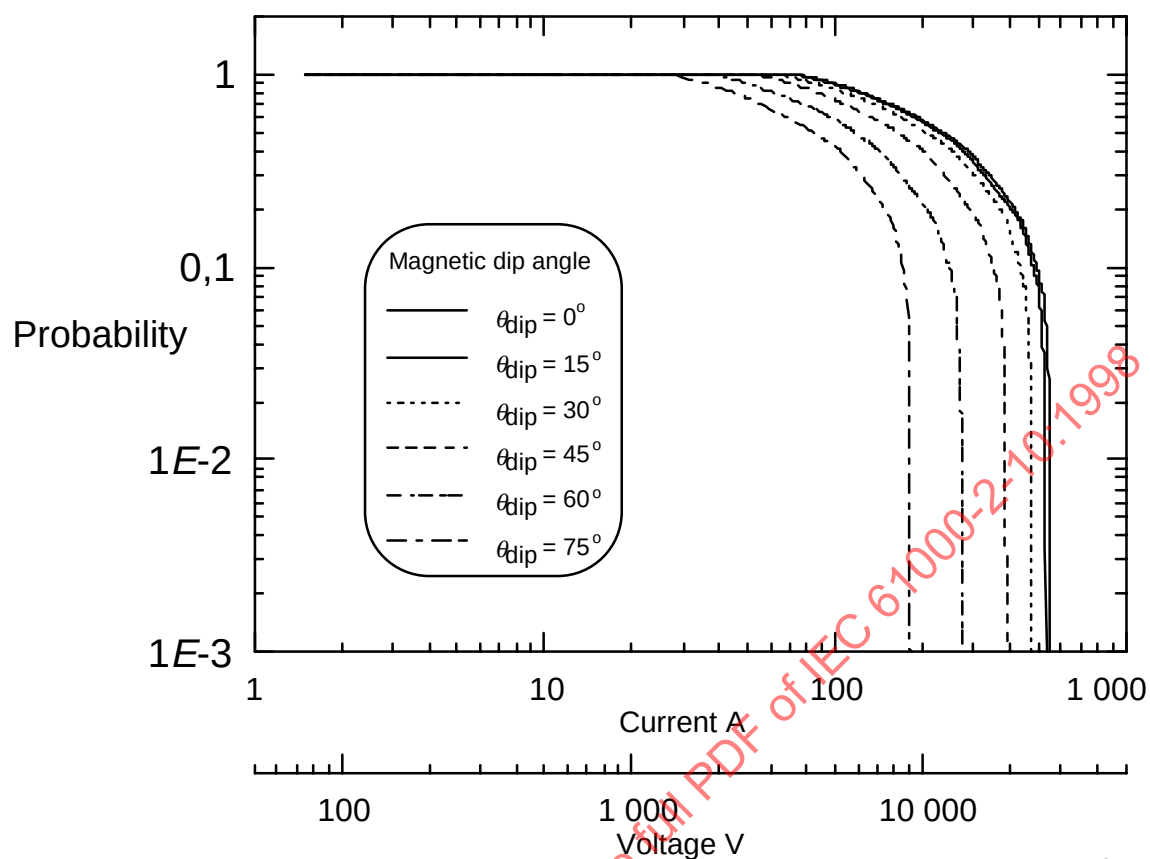
IEC 1539/98

Figure C.5 – Cumulative probability distributions for the peak responses for the 1 m vertical monopole antenna load currents and voltages



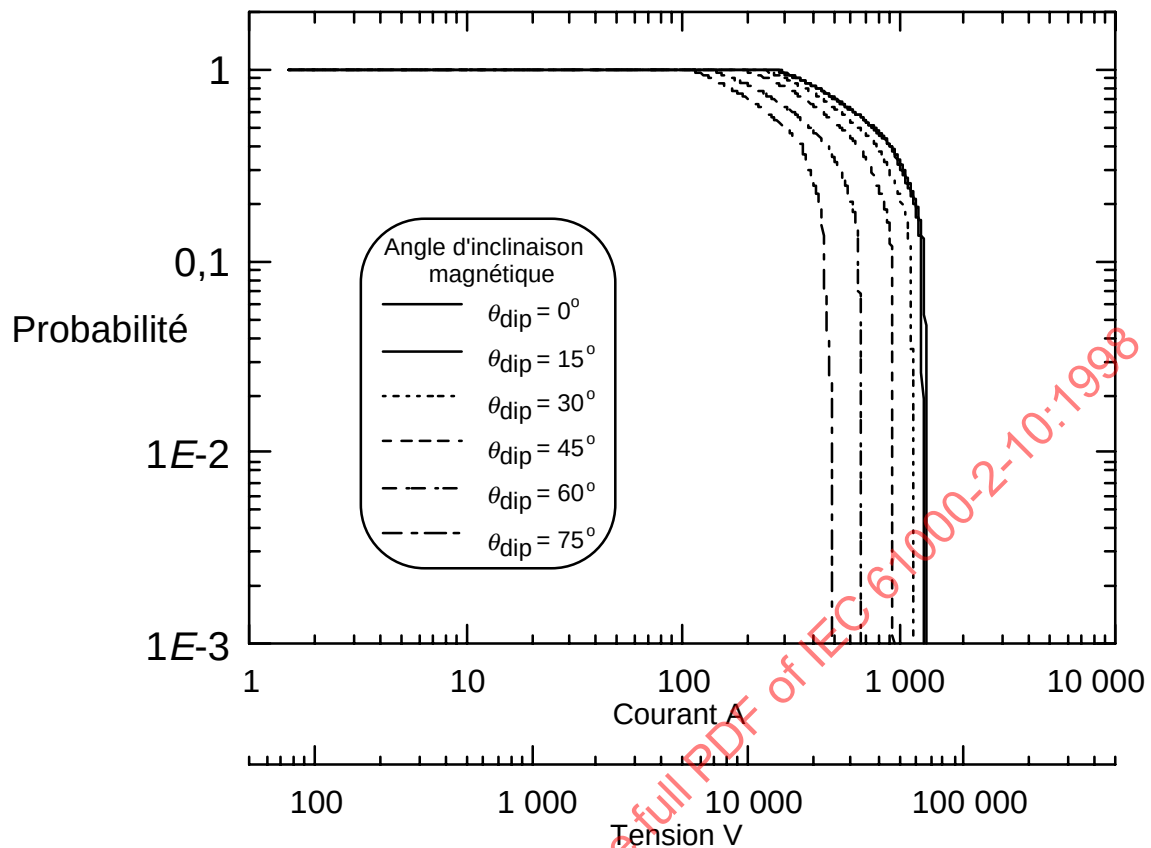
IEC 1540/98

Figure C.6 – Distributions cumulées de probabilité des réponses crêtes des courants et des tensions de charge d'un monopôle vertical de 3 m



IEC 1540/98

Figure C.6 – Cumulative probability distributions for the peak responses for the 3 m vertical monopole antenna load currents and voltages



IEC 1541/98

Figure C.7 – Distributions cumulées de probabilité des réponses crêtes des courants et des tensions de charge d'un monopôle vertical de 10 m