

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
1000-2-9**

Première édition
First edition
1996-02

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 2:

Environnement –

Section 9: Description de l'environnement

IEMN-HA – Perturbations rayonnées

Publication fondamentale en CEM

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 2:

Environment –

Section 9: Description of HEMP

environment – Radiated disturbance

Basic EMC publication



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1000-2-9: 1996

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

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

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
1000-2-9**

Première édition
First edition
1996-02

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 2:

Environnement –

Section 9: Description de l'environnement

IEMN-HA – Perturbations rayonnées

Publication fondamentale en CEM

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 2:

Environment –

Section 9: Description of HEMP

environment – Radiated disturbance

Basic EMC publication

© CEI 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

T

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
 Articles	
1 Domaine d'application et objet.....	6
2 Référence normative	6
3 Généralités	6
4 Définitions	8
5 Description de l'environnement IEMN-HA, paramètres de rayonnement.....	14
5.1 Explosion à haute altitude	14
5.2 Extension spatial de l'onde IEMN-HA à la surface de la terre.....	18
5.3 Variation de l'onde IEMN-HA avec le temps	18
5.4 Composante du champ magnétique	34
5.5 Amplitude et spectre de fluence	36
5.6 Evaluation des ondes IEMN-HA initiale, intermédiaire et finale	40
5.7 Réflexion et transmission	40

CONTENTS

	Page
FOREWORD.....	5
Clauses	
1 Scope and object	7
2 Normative reference	7
3 General	7
4 Definitions	9
5 Description of HEMP environment, radiated parameters	15
5.1 High-altitude bursts.....	15
5.2 Spatial extent of HEMP on the earth's surface.....	19
5.3 HEMP time dependence.....	19
5.4 Magnetic field component.....	35
5.5 HEMP amplitude and energy fluence spectrum	37
5.6 Weighting of the early, intermediate and late-time HEMP	41
5.7 Reflection and transmission	41

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 2: Environnement –

Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA –
Perturbations rayonnées – Publication fondamentale en CEM

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure du possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La Norme internationale CEI 1000-2-9 a été établie par le sous-comité 77C: Immunité à l'impulsion électromagnétique nucléaire à haute altitude (IEMP-HA), du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique.

Elle a le statut de publication fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de la CEI.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
77C/27/FDIS	77C/34/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.

La CEI 1000 est constituée des parties suivantes, regroupées sous le titre général *Compatibilité électromagnétique*:

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Environnement
- Partie 3: Limites
- Partie 4: Techniques d'essai et de mesure
- Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation
- Partie 6: Normes génériques
- Partie 9: Divers

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 2: Environment –
Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance –
Basic EMC publication

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 1000-2-9 has been prepared by sub-committee 77C: Immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP), of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

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

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

DIS	Report on voting
77C/27/FDIS	77C/34/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.

IEC 1000 consists of the following parts, under the general title *Electromagnetic compatibility*:

- Part 1: General
- Part 2: Environment
- Part 3: Limits
- Part 4: Testing and measurement techniques
- Part 5: Installation and mitigation guidelines
- Part 6: Generic standards
- Part 9: Miscellaneous

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 2: Environnement –

Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations rayonnées – Publication fondamentale en CEM

1 Domaine d'application et objet

La présente section de la CEI 1000-2 définit l'environnement IEMN-HA (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, rayonnements thermiques et ionisants nucléaires) n'existent pas au niveau du sol. Les impulsions électromagnétiques liées à l'explosion peuvent cependant perturber et endommager les systèmes de communication, les systèmes électroniques et 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 permettant de définir des contraintes réalistes à appliquer afin d'évaluer les performances des équipements atteints.

2 Référence normative

Le document normatif suivant contient des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente section de la CEI 1000-2. Au moment de la publication, l'édition indiquée était en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente section de la CEI 1000-2 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer l'édition la plus récente du document normatif indiqué ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes Internationales en vigueur.

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

3 Généralités

Une explosion nucléaire à haute altitude (supérieure à 30 km) engendre trois types d'impulsions électromagnétiques observées à la surface de la terre:

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

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance – Basic EMC publication

1 Scope and object

This section of IEC 1000-2 defines the high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) 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 HEMP environment in order to select realistic stresses to apply to victim equipment for evaluating their performance.

2 Normative reference

The following normative document contains provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this section of IEC 1000-2. At the time of publication, the edition indicated was valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this section of IEC 1000-2 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 50(161): 1990, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

3 General

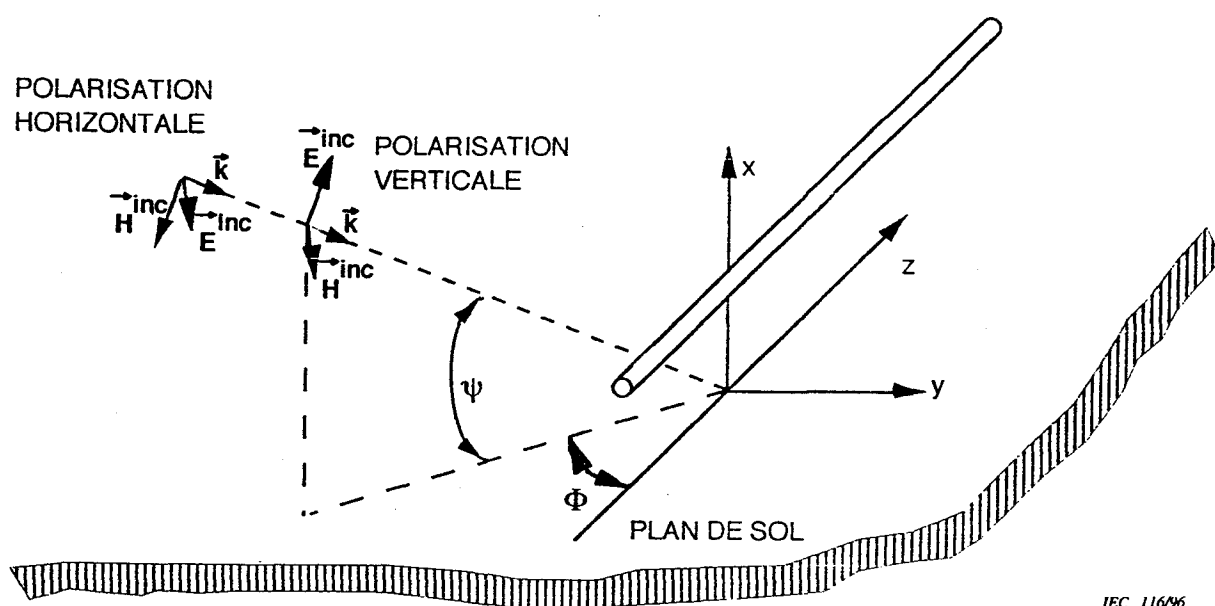
A high-altitude (above 30 km) nuclear burst produces three types of electromagnetic pulses which are observed on the earth's surface:

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

Par le passé on s'est surtout intéressé à l'impulsion IEMN-HA initiale précédemment appelée simplement onde 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 nucléaires IEM 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 détonation 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. Une impulsion IEMN-HA ayant des incidences sur des équipements électroniques éloignés a été signalée lors d'essais nucléaires américains à haute altitude dans le Pacifique Sud au début des années soixante.

4 Définitions



IEC 116/96

Figure 1 – Géométrie utilisée pour la définition de la polarisation et des angles d'élévation 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).

1) IEMN: Impulsion électromagnétique nucléaire.

2) SREMP: Source Region EMP (impulsion électromagnétique nucléaire de la région source).

3) SGEMP: System Generated EMP (impulsion électromagnétique nucléaire générée par le système).

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 NEMP¹⁾ covers many categories of nuclear EMP's 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 U.S. nuclear tests in the South Pacific during the early 1960's, producing effects on electronic equipment far from the burst location.

4 Definitions

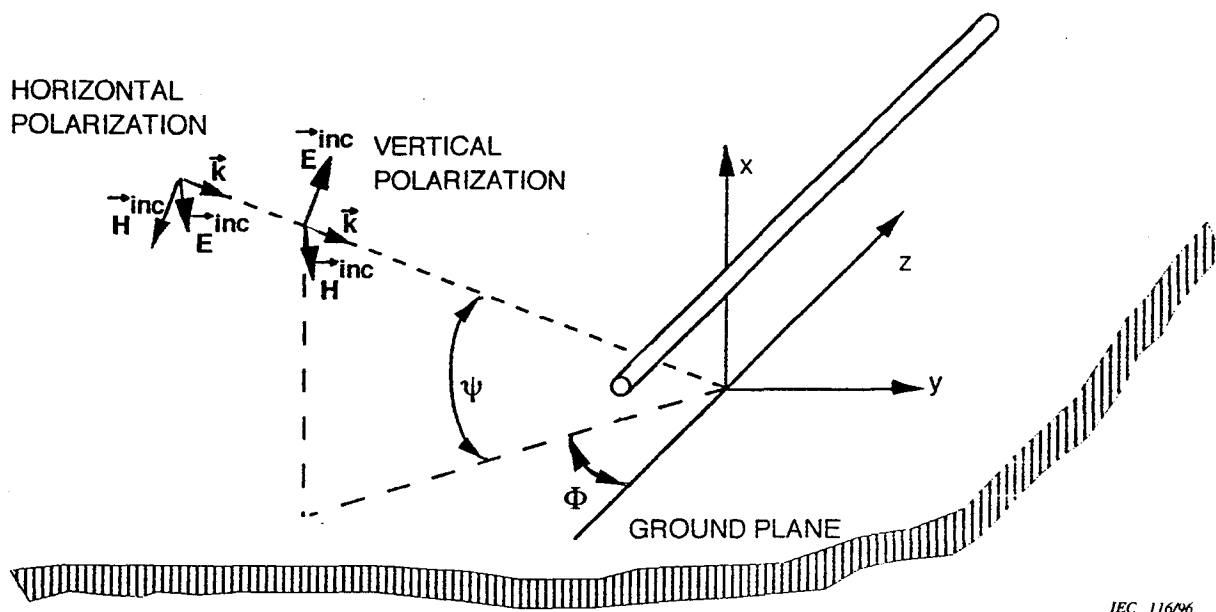


Figure 1 – Geometry for the definition of polarization and of the angles of elevation ψ and azimuth ϕ

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).

1) NEMP: Nuclear ElectroMagnetic Pulse.

2) SREMP: Source Region EMP.

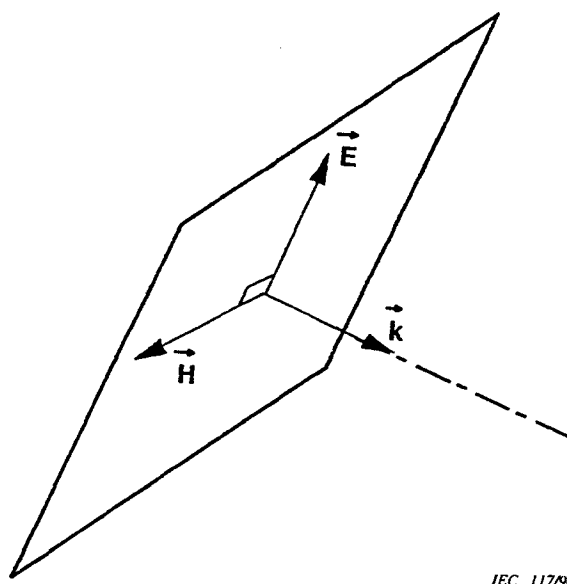
3) SGEMP: System Generated EMP.

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 et 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.

4.5 sens de propagation des ondes électromagnétiques: Sens du vecteur de propagation $\vec{k}$, perpendiculairement au plan contenant les vecteurs des champs électrique et magnétique (figure 2).



IEC 117/96

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

4.6 E_1 , E_2 , E_3 : Termes utilisés pour les champs électriques des ondes IEMN-HA initiale, intermédiaire et finale.

4.7 IEM: Toute impulsion électromagnétique, description générale.

4.8 fluence: Intégrale du vecteur de Poynting en fonction du temps, exprimée en J/m².

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 group of waveforms.

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 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).

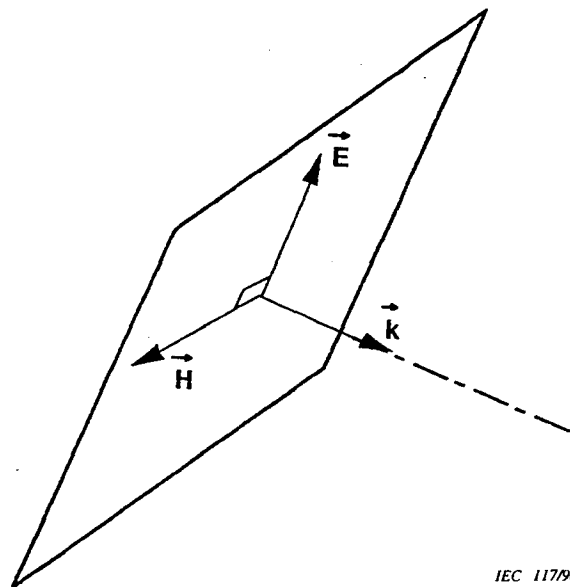


Figure 2 – Geometry for the definition of the plane wave

4.6 E_1, E_2, E_3 : Terminology for the early, intermediate and late-time HEMP electric fields.

4.7 EMP: Any electromagnetic pulse, general description.

4.8 energy fluence: Integral of the Poynting vector over time; presented in units of J/m².

4.9 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.

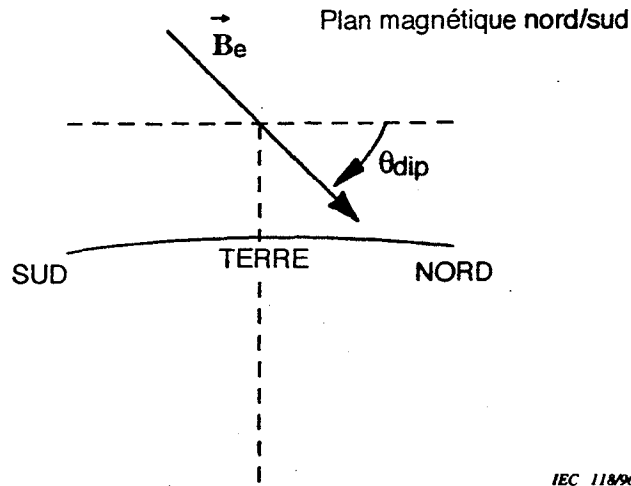


Figure 3 – Angle d'inclinaison géomagnétique

4.10 point zéro au sol: Point situé à la surface du sol immédiatement au-dessous de l'explosion.

4.11 IEMN-HA: Impulsion électromagnétique nucléaire haute altitude.

4.12 haute altitude (explosion nucléaire): Altitude d'explosion supérieure à 30 km.

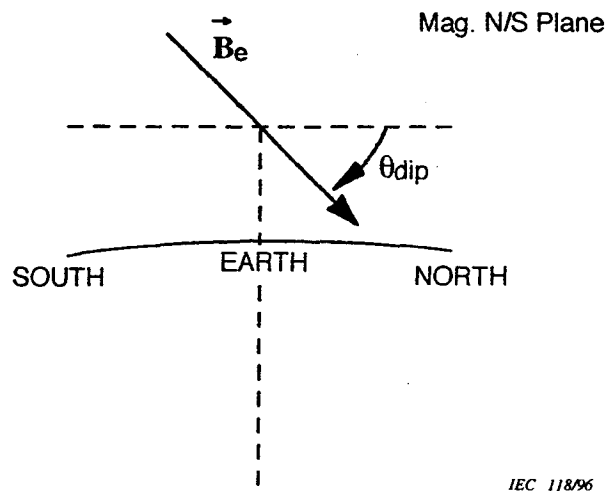
4.13 ADE: Altitude d'explosion.

4.14 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 (figure 1). (Ce type de polarisation est également appelé polarisation électrique perpendiculaire ou transverse électrique (TE).)

4.15 plan d'incidence: Plan formé par le vecteur de propagation et la normale au plan du sol.

4.16 basse altitude (explosion nucléaire): Altitude d'explosion inférieure à 1 km.

4.9 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.



IEC 118/96

Figure 3 – Geomagnetic dip angle

4.10 ground zero: Point on the earth's surface directly below the burst; sometimes called surface zero.

4.11 HEMP: High-altitude nuclear EMP.

4.12 high-altitude (nuclear explosion): Height of burst above 30 km altitude.

4.13 HOB: Height of burst.

4.14 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 (figure 1). (This type of polarization is also called perpendicular or transverse electric (TE).)

4.15 incidence plane: Plane formed by the propagation vector and the normal to the ground plane.

4.16 low-altitude (nuclear explosion): Height of burst below 1 km altitude.

4.17 IEMN: Impulsion électromagnétique (IEM) nucléaire. Tout type d'onde IEM provoqué par une explosion nucléaire.

4.18 polarisation: Orientation du vecteur de champ électrique.

4.19 rayonnement initial: Energie nucléaire libérée dans la microseconde qui suit l'explosion.

4.20 SREMP: Impulsion électromagnétique (IEM) de la région source. Onde IEMN produite dans toute région où un rayonnement initial est déjà présent produisant des courants (sources) dans l'atmosphère.

4.21 point de tangence: Tout point situé à la surface de la terre par lequel peut passer une tangente à la terre provenant du point d'explosion.

4.22 rayon de tangence: Distance mesurée à la surface de la terre entre le point zéro au sol et tout point de tangence.

4.23 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 (figure 1). (Ce type de polarisation est également appelé polarisation magnétique parallèle ou transverse magnétique (TM).)

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

5.1 Explosion à haute altitude

Lorsqu'une arme nucléaire explose à haute altitude, les radiations initiales (rayons x, rayons gamma et neutrons) déposent leur énergie dans l'air dense qui se trouve sous la zone de l'explosion. Dans cette zone de dépôt (source), les rayons gamma de l'explosion nucléaire produisent des électrons «Compton» par interaction avec les molécules de l'air; ces électrons sont déviés d'une manière cohérente par le champ magnétique terrestre. Ces courants d'électrons transverses produisent des champs électriques transverses se propageant vers le bas, à la surface de la terre. Ce phénomène conduit à la génération d'une onde IEMN-HA initiale (figure 4) qui est caractérisée par un champ électrique crête important (des dizaines de kilovolts par mètre), un temps de montée rapide (quelques nanosecondes), une durée d'impulsion courte (jusqu'à environ 100 ns) et une impédance d'onde de 377 Ω . L'onde IEMN-HA initiale expose aux radiations la surface de la terre située dans la «ligne de vision» de l'explosion, elle est polarisée transversalement par rapport au sens de propagation et au champ géomagnétique local, dans les limites de la zone de dépôt. Pour les régions septentrionales et australes (c'est-à-dire éloignées de l'équateur), ceci signifie que le champ électrique est principalement horizontal (polarisation horizontale).