

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
1662**

Première édition
First edition
1995-04

**Evaluation des risques de dommages
liés à la foudre**

**Assessment of the risk of damage
due to lightning**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1662: 1995

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 2
TECHNICAL
REPORT – TYPE 2**

**CEI
IEC
1662**

Première édition
First edition
1995-04

**Evaluation des risques de dommages
liés à la foudre**

**Assessment of the risk of damage
due to lightning**

© CEI 1995 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 **XA**

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
 Articles	
1 Généralités	10
1.1 Domaine d'application et objet	10
1.2 Références normatives	10
1.3 Termes et définitions	10
2 Evaluation des risques de dommages	12
2.1 Expression générale	12
2.2 Fréquence des coups de foudre	14
2.2.1 Fréquence des coups de foudre directs	14
2.2.2 Fréquence des coups de foudre indirects	16
2.3 Probabilité de dommages	20
2.3.1 Types et sources de dommages	20
2.3.2 Probabilité de dommages dus aux tensions de pas et de contact	22
2.3.3 Probabilité de dommages dus à un incendie, une explosion ou à des effets mécaniques ou chimiques	24
2.3.4 Probabilité de dommage dus aux surtensions	30
2.4 Fréquence des dommages dus aux coups de foudre	32
2.4.1 Fréquence des dommages dus aux tensions de pas et de contact: F_h	32
2.4.2 Fréquence des dommages dus à un incendie ou à une explosion: F_f	32
2.4.3 Fréquence des dommages dus aux surtensions: F_0	34
2.5 Pertes éventuelles moyennes	34
3 Fréquence admissible de dommages à une structure dus à la foudre	38
4 Procédure de sélection des mesures de protection	38
5 Bibliographie	46
 Annexes	
A Risque de choc	56
B Exemples d'évaluation des risques de dommages dus à la foudre	86

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	9
Clause	
1 General	11
1.1 Scope and object	11
1.2 Normative references	11
1.3 Terms and definitions	11
2 Assessment of the risk of damage	13
2.1 General expression	13
2.2 Frequency of lightning flashes	15
2.2.1 Direct lightning flash frequency	15
2.2.2 Indirect lightning flash frequency	17
2.3 Probability of damage	21
2.3.1 Types and sources of damages	21
2.3.2 Damage probability due to step and touch voltages	23
2.3.3 Damage probability due to fire, explosion, mechanical and chemical effects	25
2.3.4 Damage probability due to overvoltages	31
2.4 Frequency of damage due to lightning flashes	33
2.4.1 Frequency of damage due to step and touch voltages: F_h	33
2.4.2 Frequency of damage due to fire, explosion: F_f	33
2.4.3 Frequency of damage due to overvoltages: F_0	35
2.5 Average possible losses	35
3 Accepted lightning frequency of damage to a structure	39
4 Procedure for selection of protective measures	39
5 Bibliography	47
Annexes	
A Risk of shock	57
B Examples of the assessment of risk of damage due to lightning	87

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉVALUATION DES RISQUES DE DOMMAGES
LIÉS À LA FOUDRE

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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les 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 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 tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

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

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

La CEI 1662, rapport technique de type 2, a été établie par le comité d'études 81 de la CEI: Protection contre la foudre.

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

Projet de comité	Rapport de vote
81(SEC)58	81(SEC)61

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ASSESSMENT OF THE RISK OF DAMAGE
DUE TO LIGHTNING

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.

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

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

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

IEC 1662, which is a technical report of type 2, has been prepared by IEC technical committee 81: Lightning protection.

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

Committee draft	Report on voting
81(SEC)58	81(SEC)61

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

Le présent document est publié dans le cadre de la série de rapports techniques (de type 2) (conformément à G.4.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme provisoire» dans le domaine de l'évaluation des risques de dommages liés à la foudre. En effet, il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

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

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

Le présent document se rapporte à la CEI 1024-1 et à la CEI 1024-1-1.

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 1662-1:1995

Withd 2000

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.4.2.2 of part 1 of the IEC/ISO Directives) as a "prospective standard for provisional application" in the field of the assessment of the risk of damage due to lightning because there is an urgent need for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

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

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

This technical report is connected with IEC 1024-1 and IEC 1024-1-1.

Annexes A and B are for information only.

Withd 2000

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TS 61662:1995

INTRODUCTION

L'évaluation des risques de dommages par les impacts de foudre directs sur une structure ou proches d'une structure a pour objet d'aider l'ingénieur spécialisé dans la protection contre la foudre à décider si, à son avis, une protection de la structure est requise ou recommandée et, si c'est le cas, à sélectionner les mesures de protection appropriées.

Un coup de foudre peut causer des dommages qui sont fonction des caractéristiques de la structure, parmi lesquelles les plus importantes sont:

- la nature du matériau de construction;
- son contenu et son utilisation;
- les services entrant dans la structure;
- les mesures destinées à la limitation des dommages.

En outre, les dommages eux-mêmes peuvent être limités à une partie de la structure ou bien s'étendre à la structure complète ou encore mettre en cause les zones avoisinantes ou l'environnement.

Les dommages occasionnés par la foudre peuvent être de types différents:

- dommages corporels ou perte de vie humaine;
- perte inacceptable de services au public;
- perte d'éléments irremplaçables du patrimoine culturel;
- pertes n'impliquant aucun élément humain, culturel ou social.

Si l'un des trois premiers types de dommages concerne la structure, il convient que la décision de mettre ou non en œuvre des mesures de protection soit prise par comparaison de la valeur réelle de la fréquence des dommages à la structure avec la valeur limite fixée par les commissions nationales ou les autorités compétentes.

Si les dommages n'impliquent aucun élément humain, culturel et relatif à l'environnement, la décision de mettre ou non en œuvre des mesures de protection peut être prise par le concepteur sur la base d'éléments strictement économiques, en comparant le coût annuel des mesures de protection au montant probable du coût annuel prévisible des pertes liées à la foudre.

INTRODUCTION

The assessment of the risk of damage by direct and nearby lightning flashes to a structure aims to help the lightning protection design engineer in giving his advice whether or not the protection of the structure is required or recommended and if it is, to select the proper measures of protection.

A lightning flash can cause damage depending on the characteristics of the structure among which the most important are:

- nature of the construction material;
- contents and destination;
- services entering the structure;
- measures for damage limitation.

Moreover, the damage itself may be limited to a part of the structure or may be extended to the whole structure and may even involve the surroundings or the environment.

The damage caused by lightning may be of different types:

- injury or loss of human life;
- unacceptable loss of services to the public;
- loss of irreplaceable cultural heritage;
- losses not involving human, cultural and social values.

If one of the first three types of damage appears in the structure, the decision whether or not to provide protective measures should be taken by a comparison of the actual value of frequency of damage to the structure with the limit value fixed by National Committees or responsible authorities.

If damage does not involve human, cultural and environmental values, the decision whether or not to provide protective measures may be taken by the designer on the basis of purely economical convenience by comparing the annual cost of the protective measures to the probable amount of annual cost of expected losses due to lightning.

ÉVALUATION DES RISQUES DE DOMMAGES LIÉS À LA FOUDRE

1 Généralités

1.1 *Domaine d'application et objet*

Le présent rapport est applicable à l'évaluation des risques de dommages occasionnés par les coups de foudre au sol.

L'objet du présent rapport est de proposer les procédures d'évaluation des risques de dommages à une structure causés par les coups de foudre directs et indirects, et de permettre aux organismes concernés de fixer une valeur acceptable de la fréquence des dommages aux structures.

Une fois fixée une limite supérieure de la fréquence des dommages, la procédure proposée permet de sélectionner les mesures de protection de la structure à mettre en oeuvre.

NOTE – Les dommages aux appareils dus au couplage magnétique direct avec le courant de foudre au sol peut être d'habitude négligé.
Lorsque des appareils électroniques sensibles sont installés dans la structure, il convient que ce dommage soit aussi considéré.

1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour le présent rapport technique. 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 le présent rapport technique 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 actuellement en vigueur.

CEI 364: *Installations électriques des bâtiments*

CEI 479: *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques*

CEI 1024-1: 1990, *Protection des structures contre la foudre – Première partie: Principes généraux*

CEI 1024-1-1: 1993, *Protection des structures contre la foudre – Partie 1: Principes généraux – Section 1: Guide A – Choix des niveaux de protection pour les installations de protection contre la foudre*

1.3 *Termes et définitions*

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

1.3.1 **coup de foudre direct:** Eclair qui frappe directement la structure ou son installation de protection contre la foudre (IPF).

ASSESSMENT OF THE RISK OF DAMAGE DUE TO LIGHTNING

1 General

1.1 Scope and object

This report is applicable to the assessment of the risk of damage caused by lightning flashes to earth.

The object of this report is to give the procedure for evaluation of the risk of damage to a structure caused by direct and indirect lightning flashes, and to permit the bodies concerned to fix an acceptable value for the frequency of damage to structures.

Once an upper limit for the frequency of damage has been fixed, the procedure given allows for the selection of appropriate protective measures for the structure.

NOTE – Damage to the equipment due to direct magnetic coupling with lightning current which strikes the earth nearby the structure may be usually disregarded.
Where sensitive electronic equipment are installed in the structure, this damage should be also taken into account in the assessment of the risk.

1.2 Normative references

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

IEC 364: *Electrical installations of buildings*

IEC 479: *Effects of current on human beings and livestock*

IEC 1024-1: 1990, *Protection of structures against lightning – Part 1: General principles*

IEC 1024-1-1: 1993, *Protection of structures against lightning – Part 1: General principles – Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems*

1.3 Terms and definitions

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

1.3.1 direct lightning flash: Lightning flash which strikes directly the structure or its lightning protection system (LPS).

1.3.2 coup de foudre indirect: Eclair qui frappe la terre à proximité de la structure, ou les services entrant dans une structure.

1.3.3 fréquence des coups de foudre directs (N_d): Nombre annuel moyen prévisible de coups de foudre directs sur une structure.

1.3.4 fréquence des coups de foudre indirects (N_i): Nombre annuel moyen prévisible de coups de foudre indirects.

1.3.5 fréquence des coups de foudre sur la structure (N): Nombre annuel moyen prévisible de coups de foudre directs et indirects.

1.3.6 fréquence des coups de foudre admissible (N_c): Nombre annuel moyen maximal admissible de coups de foudre susceptibles de causer des dommages à la structure.

1.3.7 probabilité de dommages (p): Probabilité qu'un coup de foudre cause des dommages à une structure.

1.3.8 fréquence de dommages (Np): Nombre annuel moyen de coups de foudre qui causent des dommages à une structure. Peut se rapporter aux coups de foudre directs, aux coups de foudre indirects ou à tous les coups de foudre.

1.3.9 fréquence acceptable de dommages à la structure (F_a): Valeur maximale de la fréquence prévisible de dommages qu'une structure peut tolérer.

1.3.10 risque de dommage (R_d): Pertes moyennes annuelles probables (dommages corporels et dommages aux biens) dans une structure, dues aux coups de foudre.

1.3.11 installation de protection contre la foudre (IPF): Installation complète utilisée pour protéger un espace donné contre les effets des coups de foudre directs. Composée d'une installation de protection externe et d'une installation de protection interne.

1.3.12 efficacité de l'IPF (E): Rapport entre le nombre de coups de foudre directs ne pouvant pas occasionner de dommages à la structure et le nombre de coups de foudre directs sur la structure.

1.3.13 dispositif de protection contre les surtensions et les surintensités (DPS): Dispositif destiné à éliminer les surtensions et les surintensités conduites par les lignes, comme par exemple les parasurtenseurs définis dans la CEI 1024-1, y compris également les éclateurs, les varistances, les diodes, les filtres, etc.

2 Evaluation des risques de dommages

2.1 Expression générale

Pour les besoins du présent rapport technique, le risque de dommages à la structure peut être exprimé [1]*, [2] comme suit:

$$R_d = (1 - e^{-Npt}) \delta \quad (1)$$

* Les chiffres entre crochets renvoient à l'article 5, bibliographie.

1.3.2 Indirect lightning flash: Lightning flash which strikes the earth nearby the structure, or the services entering the structure.

1.3.3 direct lightning flash frequency (N_d): Expected annual number of direct lightning flashes to the structure.

1.3.4 Indirect lightning flash frequency (N_i): Expected annual number of indirect lightning flashes.

1.3.5 lightning flash frequency to the structure (N): Expected average annual number of direct and indirect lightning flashes.

1.3.6 accepted lightning frequency of flashes (N_c): Maximum accepted average annual number of lightning flashes which can cause damage to the structure.

1.3.7 probability of damage (p): Probability of a lightning flash causing damage to the structure.

1.3.8 frequency of damage (Np): Average annual number of flashes which cause damage to the structure. Can refer to direct, to indirect or to all flashes.

1.3.9 accepted frequency of damage to the structure (F_a): Maximum value of expected frequency of damage which can be tolerated by the structure.

1.3.10 risk of damage (R_d): Probable average annual losses (humans and goods) in a structure due to lightning flashes.

1.3.11 lightning protection system (LPS): Complete system used to protect a space under consideration against the effects of direct lightning. It consists of both external and internal lightning protection systems.

1.3.12 efficiency of LPS (E): Ratio of the number of direct lightning flashes which cannot cause damage to the structure, to the number of direct lightning flashes to the structure.

1.3.13 surge protective device (SPD): Device designed to suppress line conducted overvoltages and currents, such as surge suppressors defined in IEC 1024-1, including also gaps, varistors, diodes, filters, etc.

2 Assessment of the risk of damage

2.1 General expression

For the purpose of this technical report, the risk of damage to the structure may be assessed [1]*, [2] by:

$$R_d = (1 - e^{-Npt}) \delta \quad (1)$$

* Figures in square brackets refer to clause 5, bibliography.

où

N est le nombre annuel moyen prévisible d'impacts de foudre sur la structure;

p est la probabilité de dommages à la structure;

δ est la mesure du montant des pertes éventuelles relatives à la structure ou à son contenu.

Le produit $F = Np$ est le nombre annuel moyen prévisible de dommages à la structure (fréquence de dommages) [3].

Si la période d'observation t est égale à 1 an, dans le cas où $Np \ll 1$, la formule ci-dessus peut être simplifiée comme suit:

$$R_d = Np \delta \quad (2)$$

Si une installation de protection contre la foudre (IPF) est présente aux fins de limitation des dommages, le risque de dommage est réduit en fonction de son efficacité.

2.2 Fréquence des coups de foudre

2.2.1 Fréquence des coups de foudre directs

La fréquence moyenne annuelle N_d d'impacts de foudre directs sur la structure peut être évaluée par le produit de la densité annuelle de coups de foudre à la terre N_g et la surface collectrice effective de la structure A_e (voir 4.2 de la CEI 1024-1-1):

$$N_d = N_g A_e \quad (3)$$

La surface collectrice effective de la structure est définie comme la mesure de la surface au sol recevant la même fréquence annuelle d'impacts de foudre que la structure. Elle est fonction des dimensions de la structure et dépend de la topographie du sol et des objets avoisinants.

Pour les structures isolées, la surface collectrice effective A_e est la surface définie par la ligne de séparation (b1) obtenue entre l'intersection de la surface au sol et une droite de pente 1:3 passant par les parties supérieures de la structure, où elle touche la structure et tourne autour d'elle (voir la figure 1 pour les terrains plats et les figures 2A et 2B pour les terrains accidentés).

Dans le cas d'une topographie compliquée (voir figures 2C et 2D), la construction peut être simplifiée en prenant en compte certaines parties caractéristiques de la ligne de séparation et en les remplaçant par des droites ou des arcs de cercle.

Les objets avoisinants ont une influence considérable sur la surface effective si leur distance à la structure est inférieure à

$$3(h + h_s)$$

où

h est la hauteur de la structure considérée; et

h_s est la hauteur de l'objet avoisinant.

where

N is the expected average annual number of lightning flashes to the structure;

p is the probability of damage to the structure;

δ is a measure of the amount of possible losses of the structure or of its contents.

The product $F = Np$ is the expected average annual number of damages to the structure (frequency of damage) [3].

If the time of observation is $t = 1$ year, in the case of $Np \ll 1$, the preceding formula may be simplified as follows:

$$R_d = Np \delta \quad (2)$$

If a lightning protection system (LPS), as a measure of damage limitation, is applied, the risk of damage is reduced according to its efficiency.

2.2 Frequency of lightning flashes

2.2.1 Direct lightning flash frequency

The average annual frequency N_d of direct flashes to the structure can be assessed by the product of the annual ground flash density N_g and the effective collection area of the structure A_e (see 4.2 of IEC 1024-1-1):

$$N_d = N_g A_e \quad (3)$$

The effective collection area of the structure is defined as the measure of the ground surface which has the same annual frequency of direct lightning flashes as the structure. It is a function of the structure dimensions and depends on ground topography and surrounding objects.

For isolated structures, the effective collection area A_e is the area enclosed within the border line (b1) obtained from the intersection between the ground surface and a straight line with 1:3 slope which passes from upper parts of the structure, where it touches the structure, and rotating around it (see figure 1 for flat terrain and figures 2A and 2B for uneven terrain).

In the case of complicated topography (see figures 2C and 2D) the construction can be simplified taking in account some characteristic parts of the border line and replacing them with straight lines or sections of a circle.

Surrounding objects significantly influence the effective area if their distances from the structure are less than

$$3(h + h_s)$$

where

h is the height of the structure under consideration; and

h_s is the height of the surrounding object.

Dans ce cas, les surfaces effectives de la structure et de l'objet se chevauchent; la surface effective A_g est réduite et s'étend à une distance:

$$X_s = \frac{d + 3 (h_s - h)}{2} \quad (4)$$

où

d est la distance horizontale entre la structure et l'objet (voir figure 3).

Seuls les objets présentant une durabilité permanente et une tenue adéquate à la foudre doivent être pris en compte.

Dans tous les cas la valeur minimale de la surface collectrice effective doit être supposée égale à la projection horizontale de la structure elle-même.

2.2.2 Fréquence de coups de foudre indirects

La fréquence de coups de foudre indirects comprend les coups de foudre qui frappent la terre à proximité de la structure et les services entrant dans la structure [6], [7].

2.2.2.1 Fréquence de coups de foudre au sol avoisinant

La fréquence annuelle moyenne N_n des coups de foudre au sol avoisinant la structure peut être évaluée par le produit de la densité annuelle de coups de foudre à la terre N_g par la surface collectrice A_g du sol avoisinant:

$$N_n = N_g A_g \quad (5)$$

La surface collectrice du sol avoisinant, A_g , est la surface entourant la structure où un coup de foudre au sol entraîne une augmentation localisée du potentiel de terre susceptible d'influencer la structure ou les services entrant dans la structure.

Cette surface s'étend jusqu'à la ligne de séparation à la distance d_s de la structure, d_s , en mètres, numériquement égale à la valeur de la résistivité du sol (en ohms x mètres) jusqu'à une valeur maximale de 500 m.

La surface collectrice du sol avoisinant A_g peut être évaluée comme la différence entre la surface contenue dans cette ligne de séparation et la surface collectrice effective de la structure.

NOTE - Lorsque le couplage magnétique direct avec le courant de foudre au sol doit être considéré, une surface collectrice supplémentaire A_m doit être évaluée, qui s'étend jusqu'à la ligne de séparation à la distance $d_s = 500$ m de la structure.

2.2.2.2 Fréquence de coups de foudre susceptibles d'influencer les services

La fréquence de coups de foudre N_k susceptibles d'influencer les services entrant dans la structure peut être évaluée par le produit de la densité annuelle de coups de foudre à la terre N_g par la surface d'influence A_k du service:

$$N_k = N_g A_k \quad (6)$$

où

A_k est la surface d'influence du service.

In this case, the effective areas of structure and object overlap each other; the effective area A_g is reduced and it extends up to a distance:

$$X_s = \frac{d + 3(h_s - h)}{2} \quad (4)$$

where

d is the horizontal distance between the structure and the object (see figure 3).

Only those objects which have permanent durability and adequate resistance against lightning stresses shall be taken into account.

In any case a minimum value of the effective collection area is to be assumed equal to the horizontal projection of the structure itself.

2.2.2 Indirect lightning flash frequency

It involves lightning flashes nearby the structure and lightning flashes affecting the incoming services [6], [7].

2.2.2.1 Nearby lightning flash frequency

The average annual frequency N_n of flashes striking to ground nearby the structure can be assessed by the product of the annual ground flash density N_g times the collection area A_g of the ground surrounding the structure

$$N_n = N_g A_g \quad (5)$$

The collection area of the surrounding ground, A_g , is the area surrounding the structure where a stroke to ground causes a localized increase in the ground potential which may influence the structure or the services entering to the structure.

It extends up to the border line at distance d_s away from the structure, d_s in metres, being numerically equal to the soil resistivity value (in ohms x metres) up to a maximum value of 500 m.

The collection area of the surrounding ground A_g may be evaluated by the difference of the area enclosed by such border line and the effective collection area of the structure.

NOTE - When direct magnetic coupling with lightning current is to be taken into account, a further collection area A_m is to be considered, being $d_s = 500$ m.

2.2.2.2 Frequency of lightning flashes affecting an incoming service

The average annual number N_k of the flashes affecting an incoming service can be assessed by the product of the annual ground flash density N_g times the area of influence A_k of the service incoming to the structure:

$$N_k = N_g A_k \quad (6)$$

where

A_k is the area of influence of the service.

La surface d'influence A_k du service comprend:

A_{sk} la surface collectrice du service entrant (réseau de distribution électrique et de télécommunications);

A_{ak} la surface collectrice de la structure adjacente associée ayant des connexions avec la structure principale à travers le service.

$$A_k = A_{sk} + A_{ak} \quad (7)$$

Surface collectrice du service entrant: A_{sk}

La surface collectrice du service entrant est en relation avec les caractéristiques du service [8] et peut être évaluée à l'aide des expressions montrées aux tableaux 1 et 2.

Tableau 1 – Surface collectrice d'une ligne de puissance

Type du service	Surface collectrice (notes 1 et 2) m^2
Ligne aérienne de basse tension	$2\,000 \times L$
Ligne aérienne de haute tension (vers transformateur sur site)	$500 \times L$
Câble enterré de basse tension	$2 \times d_s \times L$
Câble enterré de haute tension (vers transformateur sur site)	$0,1 \times d_s \times L$
NOTES 1 L est la longueur, en mètres, de la ligne à partir de la structure principale jusqu'au premier noeud du réseau ou à la structure adjacente associée, avec une valeur maximale de 1 000 m. Lorsque la valeur de L n'est pas connue, on prendra arbitrairement une valeur de 1 000 m. 2 d_s en mètres, est numériquement égale à la valeur de résistivité du sol (en ohms $\times$ mètres) jusqu'à une valeur maximale de 500 m.	

Tableau 2 – Surface collectrice d'une ligne de télécommunications

Type du service	Surface collectrice (notes 1 et 2) m^2
Ligne-signal aérienne	$2\,000 \times L$
Câble-signal enterré	$2 \times d_s \times L$
Câble en fibre optique sans écran ou conducteur métallique	0
NOTES 1 L est la longueur, en mètres, de la ligne à partir de la structure principale jusqu'au premier noeud du réseau ou à la structure adjacente associée, avec une valeur maximale de 1 000 m. Lorsque la valeur de L n'est pas connue, on prendra arbitrairement une valeur de 1 000 m. 2 d_s en mètres, est numériquement égale à la valeur de résistivité du sol (en ohms $\times$ mètres) jusqu'à une valeur maximale de 500 m.	

The area of influence of the service A_k includes:

A_{sk} the collection area of the incoming service (mains, communication or signal lines);

A_{ak} the effective collection area of adjacent structure connected to the structure under consideration through the service.

$$A_k = A_{sk} + A_{ak} \quad (7)$$

Collection area of incoming service: A_{sk}

The value of the collection area of an incoming service is related to the characteristics of the service [8] and may be calculated by the expressions reported in table 1 and table 2.

Table 1 – Effective collection area of mains services

Type of mains service	Effective collection (notes 1 and 2) area m^2
Low voltage overhead cable	$2\,000 \times L$
High voltage overhead cable (to on-site substation)	$500 \times L$
Low voltage underground cable	$2 \times d_s \times L$
High voltage underground cable (to on-site transformer)	$0.1 \times d_s \times L$
NOTES 1 L is the length in metres of the line from the structure under consideration to the first branch point of the network or to the adjacent structure, with a maximum value of 1 000 m. When the value of L is unknown a value of 1 000 m should be assumed. 2 d_s in metres, being numerically equal to the soil resistivity value (ohms x metres) up to a maximum value of 500 m.	

Table 2 – Effective collection area of communication lines

Type of data line	Effective collection (notes 1 and 2) area m^2
Overhead signal line	$2\,000 \times L$
Underground signal line	$2 \times d_s \times L$
Fibre optic cable without a metallic shield or core	0
NOTES 1 L is the length in metres of the line from the structure under consideration to the first branch point of the network or to the adjacent structure, with a maximum value of 1 000 m. When the value of L is unknown a value of 1 000 m should be assumed. 2 d_s in metres, being numerically equal to the soil resistivity value (ohms x metres) up to a maximum value of 500 m.	

Surface collectrice de la structure adjacente associée A_{ak}

La surface collectrice de la structure adjacente associée est la surface collective de la structure ayant des connexions directes ou indirectes avec les matériels électriques ou électroniques contenus dans la structure principale.

Des exemples typiques sont les tours d'illumination alimentées par l'installation électrique du bâtiment principal; les bâtiments adjacents équipés de terminaux d'ordinateurs, d'équipements de commande et d'instrumentation; les tours de transmission.

NOTES

- 1 On admettra que la surface collectrice $A_{sk} = 0$ si le service entrant n'est pas une ligne métallique.
- 2 On admettra que la surface collectrice $A_{sk} = 0$ lorsque $L < 3 h$ (h est la hauteur de la structure).
- 3 Dans les cas de câbles multiconducteurs, le câble doit être considéré comme un seul câble.

2.3 *Probabilité de dommages*

Les dommages que peuvent causer les coups de foudre sur la structure ou dans son voisinage dépendent de plusieurs facteurs, qui sont fonction de la structure elle-même et de ses installations internes, ainsi que des mesures de protection choisies par le concepteur de l'installation de protection contre la foudre. Les valeurs de probabilité p sont utilisées pour les facteurs inhérents au bâtiment et à ses installations, et les coefficients k réduisant les valeurs de probabilité sont utilisés pour les mesures de protection que le concepteur de l'IPF peut appliquer.

2.3.1 *Types et sources de dommages*

Les types de dommages suivants doivent être pris en compte:

- 1 dommages corporels ou perte de vie humaine;
- 2 perte inacceptable de services au public;
- 3 perte d'éléments irremplaçables du patrimoine culturel;
- 4 pertes n'impliquant aucun élément humain, culturel ou social;
- 5 comme 4, hors matériel sensible.

Un ou plusieurs types de dommages dus à des sources différentes peuvent se produire dans une structure.

Les sources de dommages prises en considération dans le présent rapport technique sont les suivantes:

- S_1 tensions de contact et tensions de pas dues aux coups de foudre directs (voir annexe A);
- S_2 incendie, explosion, effets mécaniques et chimiques dus aux coups de foudre directs;
- S_3 surtensions sur matériels dues aux coups de foudre directs;
- S_4 surtensions sur matériels dues aux coups de foudre indirects;
- S_5 incendie, explosion, effets mécaniques et chimiques dus aux coups de foudre indirects.

Chaque type de dommage peut être occasionné par différentes sources de dommage selon l'exemple donné dans le tableau 3.

The collection area of adjacent associated structure A_{ak}

The effective collection area of adjacent associated structure is the collection area of the structure which have direct or indirect connection to the electrical or electronic equipment in the main structure.

Typical examples are external lighting towers supplied from the main building electrical installation, other buildings with computer terminals, control and instrumentation equipment and transmission towers.

NOTES

- 1 It should be assumed $A_{sk} = 0$ if the service entering to the structure is a no metallic line.
- 2 It should be assumed $A_{sk} = 0$ when $L < 3 h$ (h being the height of the structure).
- 3 In the case of multicore cables, the cable is considered as a single cable and not as individual circuits.

2.3 Probability of damage

Lightning to the structure or to the surroundings can cause damages depending on several factors which are functions of the structure itself and its internal installation, and of the protection measures selected by the lightning protection designer. Probability values p are used for inherent factors in the installation and building and coefficients k , reducing the probability values, are used for protection measures which the lightning protection designer can apply.

2.3.1 Types and sources of damages

The following types of damage are to be taken into account:

- 1 injury or loss of human life;
- 2 unacceptable loss of service to the public;
- 3 loss of irreplaceable cultural heritage;
- 4 losses not involving human, cultural and social values;
- 5 as type 4 but not involving sensitive equipment.

In a structure, one or more types of damage can occur due to different sources.

Sources of damage taken into consideration in this technical report include:

- S_1 touch and step voltages by direct lightning flashes (see annex A);
- S_2 fire, explosion, mechanical and chemical effects by direct lightning flashes;
- S_3 overvoltages on equipment by direct lightning flashes;
- S_4 overvoltages on equipment by indirect lightning flashes;
- S_5 fire, explosion, mechanical and chemical effects by indirect lightning flashes.

Each type of damage can be caused by different sources of damage according to the example shown in table 3.

Tableau 3 – Types et sources de dommages

Type de dommage	Source de dommage				
	Coup de foudre direct			Coup de foudre indirect	
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
1	X	X			X
2		X	X	X	X
3		X			X
4		X	X	X	X
5		X			X

2.3.2 Probabilité de dommages dus aux tensions de pas et de contact

Seules les tensions de pas et de contact à l'extérieur de la structure dues aux coups de foudre directs sont prises en compte, la probabilité de dommages dans les autres cas (à l'intérieur de la structure, dus aux coups de foudre qui frappent la terre à proximité de la structure ou les services entrant dans la structure) étant négligeable.

La probabilité de dommages dus aux tensions de pas et de contact liées à un coup de foudre direct sur la structure est donnée par:

$$p_h = k_h p'_h \quad (8)$$

où

p'_h est la probabilité de dommage dus aux tensions de pas et de contact par effet d'un coup de foudre direct sur la structure sans mesures de protection;

k_h est le facteur de réduction lié aux mesures de protection mises en oeuvre dans la structure pour atténuer les effets de la foudre.

Les valeurs de la probabilité p'_h et du facteur k_h sont données dans le tableau 4.

Table 3 – Types and sources of damage

Type of damage	Source of damage				
	By direct lightning			By indirect lightning	
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
1	X	X			X
2		X	X	X	X
3		X			X
4		X	X	X	X
5		X			X

2.3.2 Damage probability due to step and touch voltages

Only the step and touch voltages outside the structure due to direct lightning flash are considered, the damage probability being negligible in other cases (inside the structure, due to nearby lightning flashes, due to lightning flashes affecting the incoming services).

Damage probability due to step and touch voltages by direct lightning flashes to the structure is given by:

$$p_h = k_h p'_h \quad (8)$$

where

p'_h is the probability of damage due to step and touch voltages by direct flashes to the structure without protection measures;

k_h is the reducing factor relevant to the protective measures provided in the structure to mitigate the consequential effects of the lightning.

The values of probability p'_h and of the reducing factor k_h are given in table 4.

Tableau 4 – Valeurs de la probabilité de dommages p'_h dus aux tensions de pas ou de contact liées aux coups de foudre directs, et valeurs de k_h correspondant aux mesures de protection

Type de surface à l'extérieur de la structure	R_c ¹⁾ kΩ	p'_h ²⁾	Mesures de protection	k_h
Humus, béton	<1	10^{-2}	Sans IPF	1
Marbre	1-10	10^{-3}	Avec IPF	$1-E$ ³⁾
Gravier	10-100	10^{-4}	Avec IPF et conducteur de descente isolé	0,5 (1-E)
Asphalte	>100	10^{-5}	avec une épaisseur 3 mm de PVC	

1) Les valeurs obtenues sont le résultat de mesures prises entre une électrode de 400 cm² soumise à une pression de 500 N et un point distant.

2) Voir annexe A.

3) E = efficacité de l'IPF.

NOTES

- 1 Si les personnes ne sont pas habituellement exposées à l'extérieur de la structure la valeur $p'_h = 0$ doit être prise en compte.
- 2 Si plus d'une surface est mise en œuvre, la valeur de probabilité p'_h la plus élevée doit être prise en compte.
- 3 Si plus d'une mesure de protection est mise en œuvre, le facteur de réduction résultant est le produit des facteurs de réduction correspondants.

2.3.3 Probabilité de dommages dus à un incendie, une explosion ou à des effets mécaniques ou chimiques

Les dommages peuvent être occasionnés par les coups de foudre directs sur la structure (source S_2) ou par les coups de foudre indirects (source S_5).

Les probabilités de dommages qu'on doit considérer sont:

- p_t probabilité qu'une décharge dangereuse entraîne un incendie ou une explosion;
- p_1 probabilité d'une décharge dangereuse sur une installation métallique;
- p_2 probabilité d'une décharge dangereuse sur une installation électrique à l'intérieur de la structure;
- p_3 probabilité d'une décharge dangereuse sur les services entrant dans la structure;
- p_4 probabilité d'une décharge dangereuse sur les parties conductrices extérieures entrant dans la structure.

Les probabilités p_1 , p_2 et p_4 ne sont liées qu'aux coups de foudre directs; la probabilité p_3 est liée tant aux coups de foudre directs qu'aux coups de foudre indirects.

Dans le cas d'un coup de foudre direct sur la structure, la probabilité de dommages dus à un incendie, une explosion ou à des effets mécaniques ou chimiques, est:

$$p_{id} = 1 - [(1 - p_t p_1) (1 - p_t p_2) (1 - p_t p_3) (1 - p_t p_4)] \approx p_t (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) \quad (9)$$

Table 4 – Values of damage probability p'_h due to step or touch voltages by direct lightning and values of k_h relevant to protective measures

Type of surface outside the structure	R_c ¹⁾ k Ω	p'_h ²⁾	Protective measure	k_h
Humus, concrete	<1	10^{-2}	Without LPS	1
Marble	1–10	10^{-3}	With LPS	$1-E^3)$
Gravel	10–100	10^{-4}	With LPS and 3 mm PVC insulated down conductor	0,5 (1-E)
Asphalt	>100	10^{-5}		

¹⁾ The values are obtained as results of measurements between one electrode of 400 cm² pressed with a force of 500 N and a far-away point.

²⁾ See annex A.

³⁾ E = efficiency of LPS.

NOTES

- 1 If people are usually not present outside the structure $p'_h = 0$ is to be assumed.
- 2 If more than one surface is present in the dangerous place the highest value of p'_h is to be assumed.
- 3 If more than one protective measure is provided, the resulting reducing factor is the product of the relevant reducing factors.

2.3.3 Damage probability due to fire, explosion, mechanical and chemical effects

Damage may be caused by direct lightning flashes to the structure (source S_2) or by indirect lightning flashes (source S_5).

The partial probabilities of damage involved are:

- p_t probability of a dangerous sparking triggering fire or explosion;
- p_1 probability of dangerous sparking on metal installations;
- p_2 probability of dangerous sparking on electrical installations internal to the structure;
- p_3 probability of dangerous sparking on incoming services; and
- p_4 probability of dangerous sparking on incoming external conductive parts (ECP).

The probabilities p_1 , p_2 and p_4 are relevant to direct lightning flashes only; the probability p_3 is relevant to both direct and indirect flashes.

In the case of direct flashes the probability of damage due to fire, explosion, mechanical or chemical effects is:

$$p_{td} = 1 - [(1 - p_t p_1) (1 - p_t p_2) (1 - p_t p_3) (1 - p_t p_4)] \approx p_t (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) \quad (9)$$

Dans le cas d'un coup de foudre indirect, la probabilité de dommages dus à un incendie, une explosion, ou à des effets mécaniques ou chimiques, est:

$$p_{fi} = p_t p_3 \quad (10)$$

La probabilité p_t est:

$$p_t = k_t p'_t \quad (11)$$

Les valeurs de p'_t sont liées aux caractéristiques du matériau de construction et/ou du contenu de la structure [9] et sont données dans le tableau 5.

Les valeurs du facteur de réduction k_t , liées aux mesures de protection mises en oeuvre dans la structure pour atténuer les effets de l'incendie, sont données aussi dans le tableau 5.

Tableau 5 – Valeurs de la probabilité p'_t de dommages liée aux coups de foudre directs entraînant incendie, explosion, etc. et valeurs de k_t correspondant aux mesures de protection

Caractéristiques du matériau de la structure et/ou de son contenu	p'_t	Mesures de protection	k_t
Explosif	1	Equipements individuels de lutte contre l'incendie	0,9
Inflammable	10^{-1}	Moyens intégrés à la construction ¹⁾	0,7
Commun	10^{-3}	Installations automatiques ²⁾	0,6
Ininflammable	10^{-5}	Pompiers	0,5
¹⁾ Murs, portes, sols, etc. ignifugés; itinéraire d'évacuation protégé. ²⁾ Systèmes de détection d'incendie, systèmes d'extinction d'incendie.			

NOTES

1 Si plus d'une mesure de protection est mise en oeuvre, le facteur de réduction résultant est le produit des facteurs de réduction correspondants.

2 Pour une atmosphère explosible, $k_t = 1$.

Les probabilités p_1 et p_2 sont données par:

$$p_1 = k_1 p'_1 \quad (12)$$

$$p_2 = k_2 p'_2 \quad (13)$$

Les valeurs de la probabilité $p'_1 = p'_2$ sont liées aux caractéristiques du matériau de construction de la structure et sont données dans le tableau 6.

In the case of indirect flashes, the probability of damage due to fire, explosion, mechanical or chemical effects is:

$$p_{fi} = p_t p_3 \quad (10)$$

The probability p_t is:

$$p_t = k_t p'_t \quad (11)$$

The values of p'_t depend on the characteristics of the material of the structure and/or the contents [9] and are given in table 5.

The values of the reducing factor k_t relevant to the protective measures provided in the structure to mitigate the consequential effects of the fire are also given in table 5.

Table 5 – Values of damage probability p'_t relating to direct lightning which causes fire, explosion, etc. and values of k_t relevant to protective measures

Characteristics of the material of the structure and/or the contents	p'_t	Protective measure	k_t
Explosive	1	Small fire fighting equipment	0,9
Flammable	10^{-1}	Constructional facilities ¹⁾	0,7
Common	10^{-3}	Automatic installations ²⁾	0,6
Not flammable	10^{-5}	Emergency fire brigade	0,5
¹⁾ Fire resisting walls, doors, floors; protected escape route. ²⁾ Fire detection systems, fire extinguish systems.			

NOTES

1 If more than one protective measure is provided, the resulting reducing factor is the product of the relevant reducing factors.

2 For explosive atmosphere $k_t = 1$.

The probabilities p_1 and p_2 are given by:

$$p_1 = k_1 p'_1 \quad (12)$$

$$p_2 = k_2 p'_2 \quad (13)$$

The values of probability $p'_1 = p'_2$ depend on the constructional characteristics of the structure and are given in table 6.

Tableau 6 – Valeurs de la probabilité d'une décharge sur les installations électriques et métalliques à l'intérieur de la structure

Type de structure	$p'_1 = p'_2$
Brique, bois	1
Structure métallique ou béton armé	0,5
Façade métallique	0,05

Les valeurs des facteurs de réduction k_1 et k_2 , liées aux mesures de protection pour réduire la probabilité d'une décharge dangereuse sur les installations électriques et métalliques à l'intérieur de la structure, sont données dans le tableau 7.

Table 7 – Valeurs de k_1 et k_2 correspondant aux mesures de protection pour réduire les probabilités p'_1 et p'_2

Mesures de protection	k_1 et k_2
Sans IPF	1
Câbles blindés ($S \leq 1 \text{ mm}^2$)	10^{-1}
Câbles blindés ($1 < S \leq 10 \text{ mm}^2$)	10^{-2}
Câbles blindés ($S > 10 \text{ mm}^2$)	10^{-3}
Avec IPF	1-E
S: section du blindage, relié à la terre des deux côtés. E: efficacité de l'IPF.	

NOTES

- 1 Si différents câbles sont présents, seule la valeur de k_2 la plus élevée doit être prise en compte.
- 2 Dans les cas des lignes de connexion à fibre optique, $p_2 = 0$.
- 3 Dans les cas des appareils électroniques sensibles, il convient d'effectuer une évaluation plus détaillée de p'_2 et k_2 .
- 4 Si différentes mesures de protection sont prises, le facteur de réduction résultant est le produit des différents facteurs de réduction.

Table 6 – Values of probability of dangerous sparking on electrical and metal installations internal to the structure

Kind of structure	$p'_1 = p'_2$
Brick, wood	1
Steel frame or reinforced concrete	0,5
Metallic facade	0,05

The values of the reducing factors k_1 and k_2 relevant to protective measures to reduce the probability of dangerous sparking on electrical and metal installations internal to the structure are given in table 7.

Table 7 – Values of k_1 and k_2 relevant to protective measures to reduce the probability p'_1 and p'_2

Protective measures	k_1 and k_2
Without LPS	1
Screened cables ($S \leq 1 \text{ mm}^2$)	10^{-1}
Screened cables ($1 < S \leq 10 \text{ mm}^2$)	10^{-2}
Screened cables ($S > 10 \text{ mm}^2$)	10^{-3}
With LPS	1-E
S: cross section on the screen, both ends earthed. E: efficiency of LPS.	

NOTES

- 1 If different cables are present only the highest value of k_2 is to be assumed.
- 2 In the case of fibre optic connection lines, $p_2 = 0$.
- 3 In the case of sensitive equipment a more detailed evaluation of values of p'_2 and k_2 should be performed.
- 4 If different protective measures are provided, the resulting reducing factor is the product of the relevant reducing factors.

Les probabilités p_3 et p_4 sont données par:

$$p_3 = k_3 p'_3 \quad (14)$$

$$p_4 = k_4 p'_4 \quad (15)$$

où

$$p'_3 = p'_4 = 1.$$

Les valeurs des facteurs k_3 et k_4 , liées aux mesures de protection pour réduire la probabilité d'une décharge dangereuse sur les services entrant dans la structure, sont données dans le tableau 8.

Tableau 8 – Valeurs de k_3 et k_4 correspondant aux mesures de protection pour réduire la probabilité p'_3 et p'_4

Mesures de protection	k_3	Mesures de protection	k_4
Transformateur d'isolation	10^{-1}	DPS à l'entrée du service	10^{-3}
DPS à l'entrée du service	10^{-3}	Raccordement à l'équipotentialité de la structure	0
Blindage lourd relié à la terre ($S > 10 \text{ mm}^2$)	10^{-3}		
Fibre optique sans conducteur métallique	0		
S est la section du blindage			

NOTES

- 1 Si différents types de mesures de protection sont mises en oeuvre sur les différents services entrant dans la structure, la valeur de k_3 la plus élevée doit être prise en compte.
- 2 Si différents types de mesures de protection sont mises en oeuvre sur le même service, la valeur résultante du facteur de réduction est le produit des facteurs de réduction correspondants.
- 3 Dans les cas des appareils électroniques sensibles, il convient d'effectuer une évaluation plus détaillée des valeurs de k_3 .

2.3.4 Probabilité de dommages dus aux surtensions

Les dommages peuvent être occasionnés par les coups de foudre directs sur la structure (source S_3) ou par les coups de foudre indirects (source S_4).

Les probabilités de dommages qu'on doit considérer sont p_2 et p_3 . Toutes les deux sont liées aux coups de foudre directs; seule la probabilité p_3 est liée aux coups de foudre indirects.

La probabilité de dommages dus aux surtensions entraînées par les coups de foudre directs sur la structure est:

$$p_{0d} = 1 - (1 - p_2) (1 - p_3) \approx p_2 + p_3 \quad (\text{si } p_2 p_3 \ll 1) \quad (16)$$

La probabilité de dommages dus aux surtensions entraînées par les coups de foudre indirects est:

$$p_{0i} = p_3 \quad (17)$$

The probabilities p_3 and p_4 are given by

$$p_3 = k_3 p'_3 \quad (14)$$

$$p_4 = k_4 p'_4 \quad (15)$$

where

$$p'_3 = p'_4 = 1.$$

The values of the reducing factors k_3 and k_4 relevant to protective measures to reduce the probability of dangerous sparking on incoming services, are given in table 8.

Table 8 – Values of k_3 and k_4 relevant to protective measures to reduce the probability p'_3 and p'_4

Protective measures	k_3	Protective measures	k_4
Isolation transformer	10^{-1}	SPD on service entrance	10^{-3}
SPD on service entrance	10^{-3}	Bonding to the structure's earthing system	0
Earthed heavy screen ($S > 10 \text{ mm}^2$)	10^{-3}		
Fibre optic without metallic conductor	0		
S is the cross-section of the screen			

NOTES

- 1 If different protective measures are provided on different incoming services, the highest value of k_3 is to be assumed.
- 2 If different protective measures are provided on the same incoming service, the resulting reducing factor is the product of the relevant reducing factors.
- 3 In the case of sensitive equipment a more detailed evaluation of values of k_3 should be performed.

2.3.4 Damage probability due to overvoltages

Damage may be caused by direct lightning flashes to the structure (source S_3) or by indirect lightning flashes (source S_4).

The probabilities of damage involved are p_2 and p_3 . Both probabilities are relevant to direct lightning flashes; only probability p_3 is relevant to indirect lightning flashes.

The damage probability due to overvoltages on equipment by direct flashes is:

$$p_{0d} = 1 - (1 - p_2)(1 - p_3) \approx p_2 + p_3 \quad (\text{if } p_2 p_3 \ll 1) \quad (16)$$

The damage probability due to overvoltages on equipment by indirect flashes is:

$$p_{0i} = p_3 \quad (17)$$

2.4 Fréquence des dommages dus aux coups de foudre

La fréquence annuelle F des dommages à la structure prend en compte la fréquence annuelle des dommages dus aux coups de foudre directs (F_d) et indirects (F_i):

$$F = F_d + F_i \quad (18)$$

où

$$F_d = H + A + D \quad (19)$$

$$F_i = B + C + E + G \quad (20)$$

et H, A, B, C, D, E et G sont les différentes composantes de la fréquence des dommages comme dans les paragraphes suivants (2.4.1, 2.4.2, 2.4.3).

La fréquence annuelle des dommages F peut être aussi évaluée à partir des différentes sources des dommages:

$$F = F_h + F_f + F_0 \quad (21)$$

où

F_h est la fréquence des dommages dus aux tensions de pas et de contact;

F_f est la fréquence des dommages dus à l'incendie, l'explosion, etc.;

F_0 est la fréquence des dommages dus aux surtensions.

2.4.1 Fréquence des dommages dus aux tensions de pas et de contact: F_h

La valeur de la fréquence des dommages F_h dus aux tensions de pas et de contact est obtenue par l'expression suivante:

$$F_h = N_d p_h = H \quad (22)$$

où N_d et p_h sont calculés respectivement par les formules (3) et (8).

2.4.2 Fréquence des dommages dus à un incendie ou à une explosion: F_f

La valeur de F_f est obtenue par l'expression suivante:

$$F_f = N_d p_t (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + N_n p_t p_3 + p_t \sum_{k=1}^n N_k p_{3k} = A + B + C \quad (23)$$

où

A est la composante de la fréquence des dommages dus à un incendie ou une explosion entraînés par les coups de foudre directs sur la structure;

B est la composante de la fréquence des dommages dus aux coups de foudre au sol à proximité de la structure;

C est la composante de la fréquence des dommages dus à un incendie ou une explosion entraînés par les coups de foudre qui ont une influence sur les n services entrant dans la structure.

NOTE - Lorsque le couplage magnétique direct des installations électriques ou électroniques à l'intérieur de la structure avec le courant de foudre au sol doit être considéré, une composante supplémentaire B' de la fréquence des dommages, $B' = N_g A_m p_t p_2$, doit être évaluée.

2.4 Frequency of damage due to lightning flashes

The annual frequency of damage F to the structure takes into account the annual frequency of damage due to direct (F_d) and indirect (F_i) lightning flashes:

$$F = F_d + F_i \quad (18)$$

where

$$F_d = H + A + D \quad (19)$$

$$F_i = B + C + E + G \quad (20)$$

and H, A, B, C, D, E and G are the different components of the frequency of damage as in the following subclauses (2.4.1, 2.4.2, 2.4.3).

The annual frequency of damage F may be also evaluated according to the sources of damage:

$$F = F_h + F_f + F_0 \quad (21)$$

where

F_h is the frequency of damage due to step and touch voltages;

F_f is the frequency of damage due to fire, explosion, etc.;

F_0 is the frequency of damage due to overvoltages.

2.4.1 Frequency of damage due to step and touch voltages: F_h

The value of the frequency of damage F_h due to step and touch voltages is obtained by the following expression:

$$F_h = N_d p_h = H \quad (22)$$

where N_d and p_h are calculated by the formula (3) and (8) respectively.

2.4.2 Frequency of damage due to fire, explosion: F_f

The value of F_f is calculated by the following expression:

$$F_f = N_d p_t (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + N_n p_t p_3 + p_t \sum_{k=1}^n N_k p_{3k} = A + B + C \quad (23)$$

where

A is the component of the frequency of damage due to fire, explosion, by direct lightning flashes;

B is the component of the frequency of damage due to nearby lightning flashes;

C is the component of the frequency of damage due to fire or explosion by the lightning flashes affecting the n incoming services.

NOTE - When direct magnetic coupling of internal electric installations with lightning current which strikes the earth nearby the structure is to be taken into account, a component B' of the frequency of damage $B' = N_g A_m p_t p_2$ shall be considered.

2.4.3 Fréquence des dommages dus aux surtensions: F_0

La valeur de F_0 est obtenue par l'expression suivante:

$$F_0 = N_d (p_2 + p_3) + N_n p_3 + \sum_{k=1}^n N_k p_{3k} = D + E + G \quad (24)$$

où

D est la composante de la fréquence des dommages entraînés par les coups de foudre directs sur la structure;

E est la composante de la fréquence des dommages dus aux surtensions entraînées par les coups de foudre au sol à proximité de la structure;

G est la composante de la fréquence des dommages dus aux surtensions entraînées par les coups de foudre qui ont une influence sur les n services entrant dans la structure.

NOTE – Lorsque le couplage magnétique direct des installations électriques et électroniques à l'intérieur de la structure avec le courant de foudre au sol doit être considéré, une composante supplémentaire E' de la fréquence des dommages $E' = N_g A_m p_2$ doit être évaluée.

Pour chaque type de dommages (voir tableau 3), les différentes composantes de la fréquence des dommages à prendre en considération sont indiquées dans le tableau 9, selon que les coups de foudre sont directs ou indirects.

Tableau 9 – Composantes de la fréquence des dommages pour chaque type de dommage et selon les coups de foudre directs et indirects sur la structure

Type de dommage	Composantes de la fréquence des dommages						
	Coup de foudre direct			Coup de foudre indirect			
	H	A	D	B	C	E	G
1	X	X		X	X		
2		X	X	X	X	X	X
3		X		X	X		
4		X	X	X	X	X	X
5		X		X	X		

2.5 Pertes éventuelles moyennes

Les pertes éventuelles moyennes δ susceptibles d'apparaître à la suite d'un impact de foudre entraînant des dommages à la structure dépendent:

- du nombre de personnes et de la durée de leur présence sur le site dangereux;
- du type et de l'importance des services au public;
- de la valeur des biens concernés.

2.4.3 Frequency of damage due to overvoltages: F_0

The value of F_0 is calculated by the following expression:

$$F_0 = N_d (p_2 + p_3) + N_n p_3 + \sum_{k=1}^n N_k p_{3k} = D + E + G \quad (24)$$

where

D is the component of the frequency of damage due direct lightning flashes;

E is the component of the frequency of damage due to overvoltages by nearby lightning flashes;

G is the component of the frequency of damage due to overvoltages by the lightning flashes affecting the n incoming services.

NOTE – When direct magnetic coupling of internal electric installations with lightning current which strikes the earth nearby the structure is to be taken into account, a component E' of the frequency of damage $E' = N_g A_m p_2$ shall be considered.

For each type of damage (see table 3) the components of the frequency of damage are listed in table 9 according to direct and indirect lightning flashes.

Table 9 – Components of the frequency of damage for each type of damage and according to direct and indirect lightning flashes to the structure

Type of damage	Components of the frequency of damage						
	Direct lightning flash			Indirect lightning flash			
	H	A	D	B	C	E	G
1	X	X		X	X		
2		X	X	X	X	X	X
3		X		X	X		
4		X	X	X	X	X	X
5		X		X	X		

2.5 Average possible losses

The average possible losses δ which may appear as a result of lightning causing damage to the structure depend on:

- the number of people and length of time of their presence in the dangerous place;
- the type and importance of service to the public;
- the value of goods involved.

En fonction du type de dommage, les valeurs de δ peuvent être évaluées par les formules approchées suivantes:

- *Dommages du type 1: Dommages corporels ou perte de vie humaine*

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{t}{8\,760}\right)^n \quad \text{(probabilité de présence d'une personne sur le site dangereux)} \quad (25)$$

où

n est le nombre de personnes se trouvant sur le site dangereux;

t est la durée totale annuelle, en heures, de la présence de personnes sur le site dangereux.

- *Dommages du type 2: Perte inacceptable de services au public*

$$\delta = \frac{n't'}{n_t 8\,760} \quad \text{(quantité relative des pertes prévisibles, par dommage)} \quad (26)$$

où

n' est le nombre moyen d'utilisateurs affectés par la perte du service, par dommage;

t' est la durée totale annuelle, en heures, de la perte de service, par dommage;

n_t est le nombre total d'utilisateurs concernés par le service.

- *Dommages du type 3: Perte d'éléments de patrimoine irremplaçables*

$$\delta = \frac{c_i}{c_t} \quad \text{(quantité relative des pertes prévisibles, par dommage)} \quad (27)$$

où

c_i est la valeur du capital assuré des pertes de biens prévisibles, en unité monétaire par dommage;

c_t est la valeur du capital assuré de tous les biens concernés, en unité monétaire.

- *Dommages des types 4 et 5: Pertes n'impliquant aucun élément humain, culturel ou relatif à l'environnement*

$$\delta = \frac{c_m}{c_v} \quad \text{(quantité relative des pertes prévisibles, par dommage)} \quad (28)$$

où

c_m est la valeur moyenne des pertes prévisibles en bâtiment, mobilier et biens, en unité monétaire par dommage;

c_v est la valeur totale de tout le bâtiment, tout le mobilier et tous les biens, en unité monétaire.

According to the type of damage, values of δ may be evaluated by the following approximated formula:

– *Damage 1: Injury or loss of human life*

$$\delta = 1 - \left(1 - \frac{t}{8\,760}\right)^n \quad \text{(probability of one person being present in the dangerous place)} \quad (25)$$

where

n is the number of persons in the dangerous place;

t is the yearly time, in hours, of presence of persons in the dangerous place.

– *Damage 2: Unacceptable loss of services to the public*

$$\delta = \frac{n' t'}{n_t 8\,760} \quad \text{(relative amount of the expected losses per damage)} \quad (26)$$

where

n' is the average number of users affected by the loss of service, per damage;

t' is the yearly time, in hours, of service loss, per damage;

n_t is the total number of users involved in the service.

– *Damage 3: Loss of irreplaceable heritage*

$$\delta = \frac{c_i}{c_t} \quad \text{(relative amount of the expected losses, per damage)} \quad (27)$$

where

c_i is the value of the insured capital of the expected losses of goods, in currency per damage;

c_t is the value of the insured capital of all the goods involved, in currency.

– *Damage 4 and 5: Losses not involving human, cultural or environmental values*

$$\delta = \frac{c_m}{c_v} \quad \text{(relative amount of the expected losses, per damage)} \quad (28)$$

where

c_m is the average value of expected losses of building, furnitures and goods, in currency per damage;

c_v is the total value of all the building, furniture and goods, in currency.

3 Fréquence admissible de dommages à une structure dus à la foudre

La protection contre la foudre a pour objet de ramener le risque de dommage R_d en dessous d'un niveau maximal admissible R_a [2], [3]:

$$R_d \leq R_a \quad (29)$$

Si plus d'un type de dommage est susceptible de se produire sur une structure, le respect de la condition $R_d \leq R_a$ est exigé pour chaque type de dommage.

Les valeurs de R_a doivent être fixées par les organismes nationaux concernés si la foudre entraîne des pertes impliquant des éléments humains, culturels ou sociaux; des valeurs représentatives de R_a sont listées dans le tableau 10.

Tableau 10 – Valeurs représentatives des risques acceptables

Type de dommage	R_a	
1	10^{-5}	Nombre annuel de morts
2	10^{-3}	Perte annuelle de services
3	10^{-3}	Perte annuelle de patrimoine

Les valeurs R_a peuvent être fixées par le propriétaire de la structure ou par l'ingénieur spécialisé dans la protection contre la foudre lorsque les pertes dues à la foudre ne concernent que des éléments privés (dommages de type 4 et de type 5).

En raison de la condition $R_d \leq R_a$, il convient que la fréquence de dommage à la structure soit limitée à la valeur F_a déclarée tolérable pour la structure:

$$F = N p \leq F_a \quad (30)$$

où

$$F_a = \frac{R_a}{\delta} \quad (31)$$

et en conséquence il convient que la fréquence d'impacts de foudre sur la structure soit limitée à la valeur N_c déclarée tolérable pour la structure:

$$N \leq N_c$$

où

$$N_c = \frac{F_a}{p} \quad (32)$$

4 Procédure de sélection des mesures de protection

Pour chaque structure considérée, il convient qu'un ingénieur spécialisé dans la protection contre la foudre décide si une protection est requise ou non et, si une protection est requise, qu'il sélectionne les mesures de protection appropriées.

Un synoptique permettant de déterminer si une protection est requise et de sélectionner les mesures de protection appropriées est donné à la figure 4.

3 Accepted lightning frequency of damage to a structure

Protection against lightning aims to reduce the risk of damage R_d below an accepted maximum level R_a [2], [3]:

$$R_d \leq R_a \quad (29)$$

If more than one type of damage is likely to occur in a structure, compliance of condition $R_d \leq R_a$ is required for each type of damage.

Values of R_a are to be fixed by national bodies concerned if the lightning causes losses involving human, cultural or social values; representative values of R_a are listed in table 10.

Table 10 – Representative values of acceptable risk

Type of damage	R_a	
1	10^{-5}	Annual loss of life
2	10^{-3}	Annual loss of service
3	10^{-3}	Annual loss of heritage

The values R_a can be fixed by the owner of the structure or by the lightning protection design engineer when losses due to lightning are relevant to private values only (type 4 and type 5 damages).

As a consequence of condition $R_d \leq R_a$ the frequency of damage to the structure should be limited to the value F_a accepted as tolerable for the structure:

$$F = N p \leq F_a \quad (30)$$

where

$$F_a = \frac{R_a}{\delta} \quad (31)$$

and, as a consequence, the lightning flash frequency to the structure should be limited to the value N_c accepted as tolerable for the structure:

$$N \leq N_c$$

where

$$N_c = \frac{F_a}{p} \quad (32)$$

4 Procedure for selection of protective measures

For every structure considered a lightning protection design engineer should decide whether or not the protection is required. If protection is required, he should select the proper protective measures.

The flow diagram to ascertain if protection is required and to select proper protective measures is given in figure 4.

Les éléments essentiels de la procédure de sélection permettent l'évaluation:

- du nombre de coups de foudre;
- de la probabilité de dommages;
- de l'étendue des dommages,

et sont respectivement donnés dans les tableaux 11, 12 et 13.

Il convient que la valeur de la fréquence de dommages annuelle admissible F_a soit comparée à la valeur effective de la fréquence annuelle de dommages sur la structure F :

- si $F \leq F_a$, la protection contre la foudre n'est pas requise;
- si $F > F_a$, il convient de mettre en oeuvre des mesures de protection.

Les mesures de protection possibles sont les suivantes:

- mesures destinées à limiter les tensions de contact et de pas afin de réduire la probabilité de dommages p_h ;
- mesures destinées à limiter la propagation de l'incendie afin de réduire la probabilité de dommages p_i ;
- mesures destinées à atténuer les effets de l'impulsion électromagnétique de foudre afin de réduire la probabilité de dommages p_1 et p_2 ;
- installation de DPS sur les services entrants afin de réduire la probabilité de dommage p_3 ;
- installation d'une IPF afin de réduire la probabilité de dommages p_h , p_1 , p_2 , p_3 et p_4 .

La sélection des mesures de protection doit être faite par l'ingénieur spécialisé dans la protection contre la foudre, qui prendra en compte la contribution individuelle de chaque source de dommage à la fréquence annuelle globale de dommage à la structure, ainsi que les aspects techniques et économiques liés à chaque mesure de protection différente.

Lors de la sélection de ces mesures de protection, la fréquence F_d des dommages dus aux coups de foudre directs et la fréquence F_i des dommages dus aux coups de foudre indirects doivent être prises en considération séparément.

Si $F_d > F_a$, il convient d'installer une IPF d'efficacité E , où

$$E_1 \leq E \leq E_2 \quad (33)$$

et

$$E_1 = 1 - \frac{F_a}{H + A} \quad (34)$$

$$E_2 = 1 - \frac{F_a}{H + A + D} \quad (35)$$

L'IPF et ses DPS associés sur les services entrants réduiront aussi la fréquence de dommages dus aux coups de foudre indirects et atténueront les effets de l'impulsion électromagnétique de foudre.

The essential data for the selection procedure are relevant to the assessment of:

- the number of lightning flashes;
- the probability of damage;
- the extent of the damage

and are given in table 11, 12 and 13, respectively.

The value of accepted annual frequency of damage F_a should be compared with the actual value of annual frequency of damage to the structure F :

- if $F \leq F_a$, protection against lightning is not required;
- if $F > F_a$, protective measures should be provided.

Possible protective measures are:

- measures to limit touch and step voltages in order to reduce the probability of damage p_h ;
- measures to limit fire propagation in order to reduce the probability of damage p_t ;
- measures to mitigate the effect of LEMP in order to reduce the probability of damage p_1 and p_2 ;
- installation of SPD on incoming services to reduce the probability of damage p_3 ;
- installation of LPS to reduce the probability of damage p_h , p_1 , p_2 , p_3 and p_4 .

The selection of protection measures has to be made by the lightning protection design engineer, taking into account the contribution of each single source of damage to the overall annual frequency of damage to the structure, as well as the technical and economical aspects related to each different protective measure.

In the selection of these protective measures, the frequency of damage F_d due to direct flashes and the frequency of damage F_i due to indirect flashes are to be considered separately.

If $F_d > F_a$, a LPS with an efficiency E should be installed, where

$$E_1 \leq E \leq E_2 \quad (33)$$

and

$$E_1 = 1 - \frac{F_a}{H + A} \quad (34)$$

$$E_2 = 1 - \frac{F_a}{H + A + D} \quad (35)$$

The LPS with its associated SPD on incoming services will also reduce the frequency of damage due to indirect lightning flashes and mitigate the effects of the LEMP.

Si l'efficacité E de l'IPF installée est inférieure à E_2 , il convient de mettre en oeuvre une protection contre l'impulsion électromagnétique de foudre.

Si $F_d \leq F_a$, aucune IPF n'est requise. Toutefois, il convient d'installer des DPS sur les lignes entrantes si $F_i > F_a$.

Si

$$F_d \leq F_a$$

$$F_i \leq F_a$$

et

$$F > F_a$$

il convient d'envisager d'autres mesures de protection afin de réduire les facteurs les plus élevés pour l'évaluation de la probabilité des dommages.

Les mesures de protection à adopter dans les différents cas sont récapitulées dans le tableau 14.

Tableau 11 – Données nécessaires à l'évaluation du nombre de coups de foudre, N

Données	Coup de foudre	
	Direct	Indirect
Dimensions (a, b, h) et implantation de la structure	X	X
Objets avoisinants (dimensions et implantation)	X	X
Services entrants: réseau de distribution électrique et télécommunications (nombre et implantation)		X
Résistivité du sol		X

Tableau 12 – Données concernant le type et l'étendue des dommages

Données	Coup de foudre	
	Direct	Indirect
Types et sources de dommages (voir 2.3; tableau 3)	X	X
Nombre de personnes et temps d'exposition aux situations dangereuses	X	X
Durée de la perte de service au public et nombre de personnes concernées	X	X
Valeur assurée des éléments de patrimoine irremplaçables	X	X
Valeur moyenne de la perte de biens estimée	X	X
Niveau maximal admissible du risque de dommage R_a (tableau 10)	X	X

If the efficiency E of LPS installed is lower than E_2 , protection against LEMP should be provided.

If $F_d \leq F_a$, a LPS is not required. However SPD on incoming lines should be installed if $F_i > F_a$.

If

$$F_d \leq F_a$$

$$F_i \leq F_a$$

and

$$F > F_a$$

other protection measures should be considered which reduce the highest single factors for the assessment of probability of damage.

Protective measures to be adopted in different cases are summarized in table 14.

Table 11 – Input data relevant to the assessment of the number of lightning flashes, N

Data	Flash	
	Direct	Indirect
Structure dimensions (a, b, h) and location	X	X
Surrounding objects (dimensions and location)	X	X
Incoming services, mains and communication (number and location)		X
Resistivity of soil		X

Table 12 – Input data relevant to the types and extent of damage

Data	Flash	
	Direct	Indirect
Types and sources of damage (see 2.3, table 3)	X	X
Number of persons and their exposure time to hazardous situations	X	X
Time and number of users affected by loss of service to the public	X	X
Insured value of irreplaceable cultural heritage	X	X
Average value of estimated loss of goods	X	X
Accepted maximum level for risk of damage R_a (table 10)	X	X

Tableau 13 – Données concernant la probabilité de dommages, p

Données	Coup de foudre	
	Direct	Indirect
Couche de surface du sol (tableau 4)	X	
Matériaux de construction et contenu de la structure (tableau 5)	X	X
Mesure mise en œuvre pour limiter la propagation de l'incendie (tableau 5)	X	X
Type de structure (tableau 6) et type de circuits de distribution électrique et de télécommunications à l'intérieur de la structure (tableau 7)	X	
Type de ligne de distribution électrique et de télécommunications entrant dans la structure (tableaux 1, 2 et 8)	X	X

Tableau 14 – Mesures de protection possibles pour différents niveaux de risque

Niveau de risque	Mesures de protection				
	Aucune protection	DPS	IPF	Protection contre l'IMF	Autres mesures de protection
$F \leq F_a$	X				
$F > F_a$ $F_d > F_a$ $F_i \leq F_a$			X et/ou X		
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F_i > F_a$		X			
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F_i \leq F_a$					X

Table 13 – Input data relevant to the probability of damage, p

Data	Flash	
	Direct	Indirect
Surface layer of the soil (table 4)	X	
Construction materials and structural content (table 5)	X	X
Measure provided to limit fire propagation (table 5)	X	X
Type of structure (table 6) and of mains and communication circuits inside the structure (table 7)	X	
Type of mains and communication lines, entering the structure (tables 1, 2 and 8)	X	X

Table 14 – Possible protective measures for different levels of risk

Level of risk	Protection measure				
	No protection	SPD	LPS	Protection against LEMP	Other protective measures
$F \leq F_a$	X				
$F > F_a$ $F_d > F_a$ $F_i \leq F_a$			X and/or X		
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F_i > F_a$		X			
$F > F_a$ $F_d \leq F_a$ $F_i \leq F_a$					X

5 Bibliographie

- [1] Flisowski Z., Mazzetti C.: "A new approach to the complex assessment of the lightning hazard impending over buildings". Bull. of Polish Academy of Sciences, no. 8/9, 1984.
- [2] Flisowski Z., Mazzetti C.: "Il rischio di danno per fulminazione atmosferica delle strutture". L'Energia Elettrica, no. 2, 1985.
- [3] Horvath T.: "Evaluation of the risk of lightning protection systems". ICLP '88, Paper 6.9, Graz.
- [4] Horvath T.: "Computation of lightning protection". Research Studies Press LTD, England 1991.
- [5] NFPA 78: "Lightning protection code, Appendix I: Risk Assessment Guide".
- [6] BS 6651: "British Standard Code of practice for Protection of structures against lightning", 1990.
- [7] BS 91/28736 DC: "Draft amendment to BS 6651 - Protection of structure against lightning (new informative appendix covering protection of electric equipment against lightning)", 1991.
- [8] IEEE Std 587 – 1980: Guide for Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits, 1981.
- [9] Flisowski Z., Mazzetti C., Nucci C.A., Pompili M.: "Explosion and fire hazard due to lightning stroke into arrangement of structure protection". Paper 7.7, 19 ICLP (1988), Graz.

5 Bibliography

- [1] Flisowski Z., Mazzetti C.: "A new approach to the complex assessment of the lightning hazard impending over buildings". Bull. of Polish Academy of Sciences, no. 8/9, 1984.
- [2] Flisowski Z., Mazzetti C.: "Il rischio di danno per fulminazione atmosferica delle strutture". L'Energia Elettrica, no. 2, 1985.
- [3] Horvath T.: "Evaluation of the risk of lightning protection systems". ICLP '88, Paper 6.9, Graz.
- [4] Horvath T.: "Computation of lightning protection". Research Studies Press LTD, England 1991.
- [5] NFPA 78: "Lightning protection code, Appendix I: Risk Assessment Guide".
- [6] BS 6651: "British Standard Code of practice for Protection of structures against lightning", 1990.
- [7] BS 91/28736 DC: "Draft amendment to BS 6651 – Protection of structure against lightning (new informative appendix covering protection of electric equipment against lightning)", 1991.
- [8] IEEE Std 587 – 1980: Guide for Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits, 1981.
- [9] Flisowski Z., Mazzetti C., Nucci C.A., Pompili M.: "Explosion and fire hazard due to lightning stroke into arrangement of structure protection". Paper 7.7, 19 ICLP (1988), Graz.

CEI 201/95

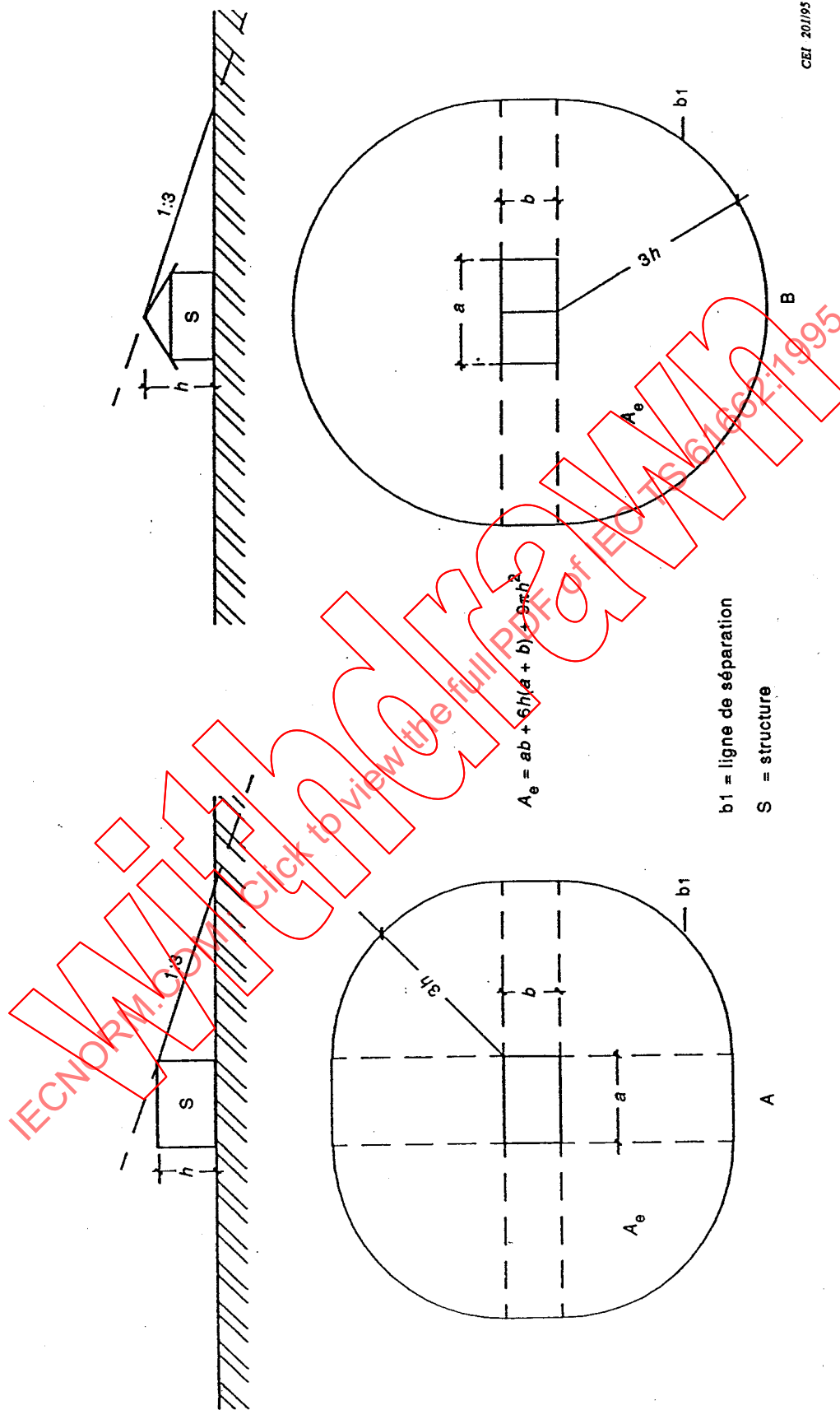
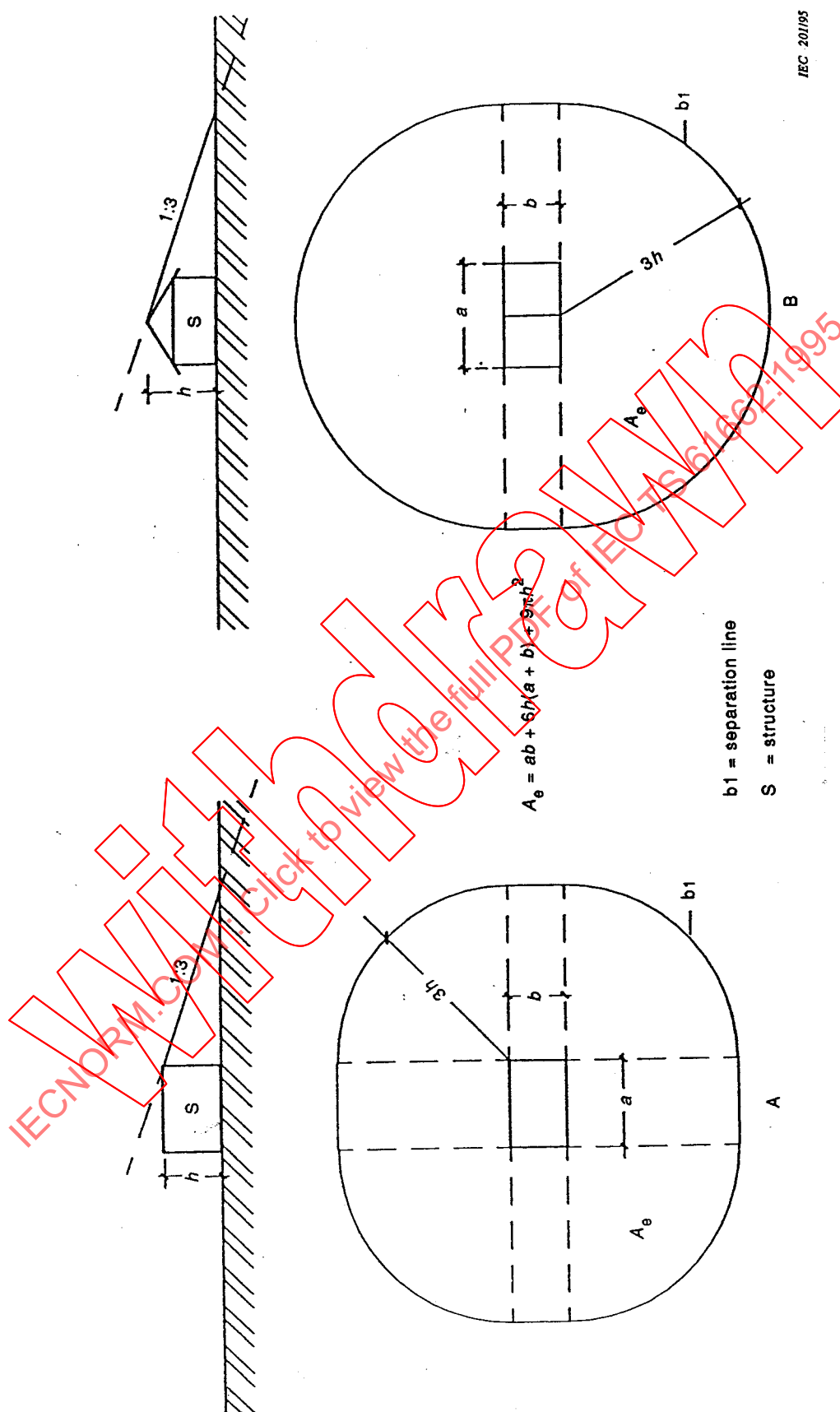
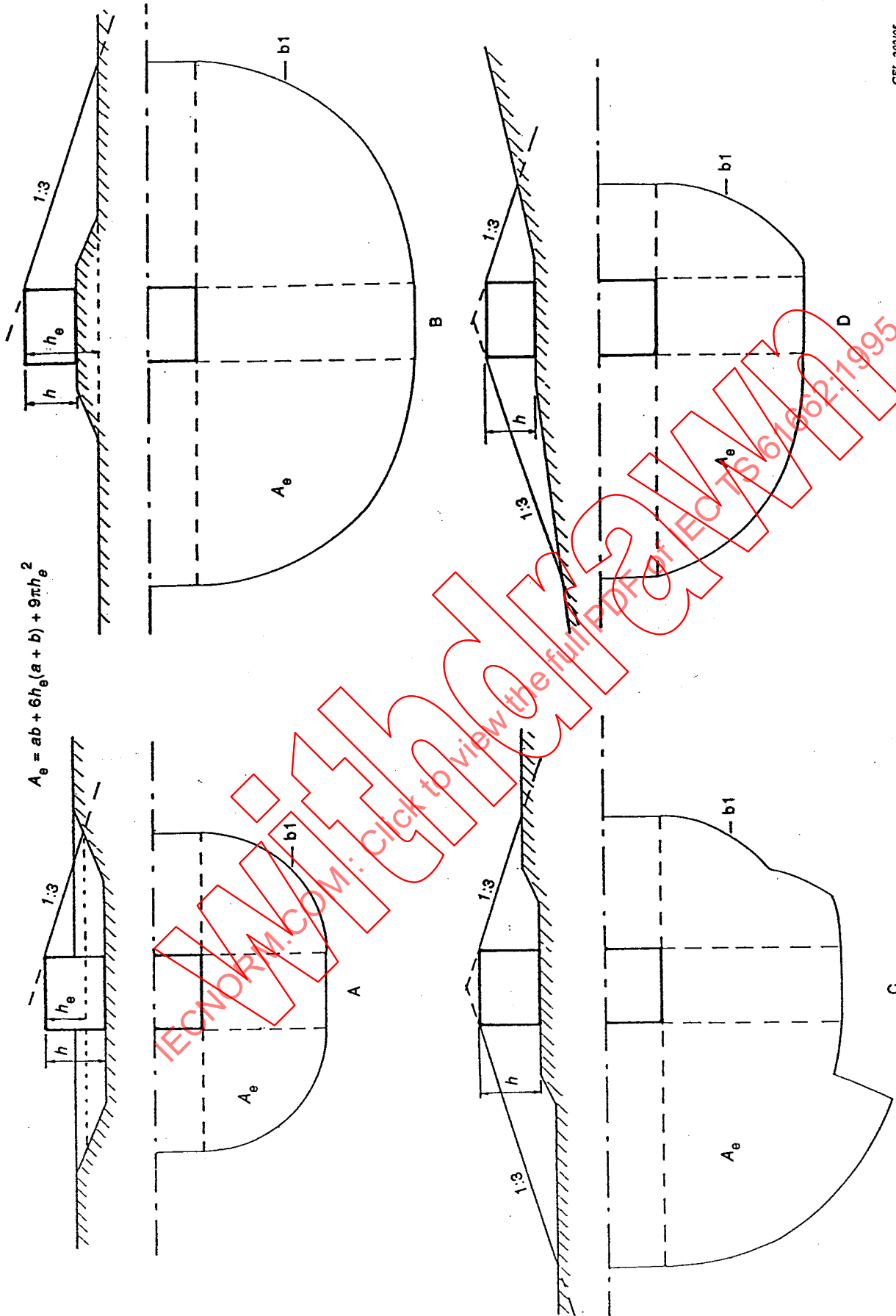


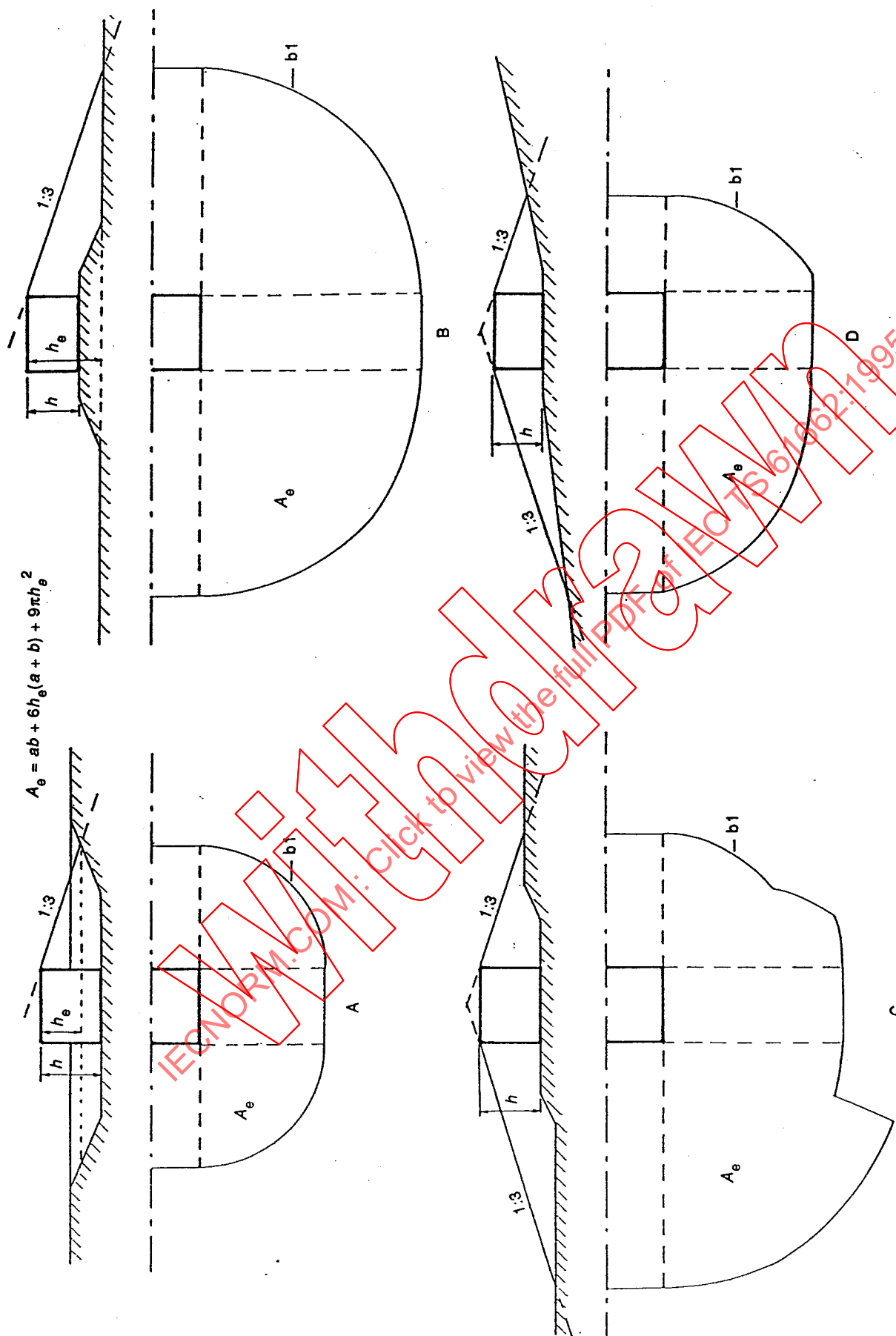
Figure 1 – Surface collectrice effective A_e d'une structure en terrain plat

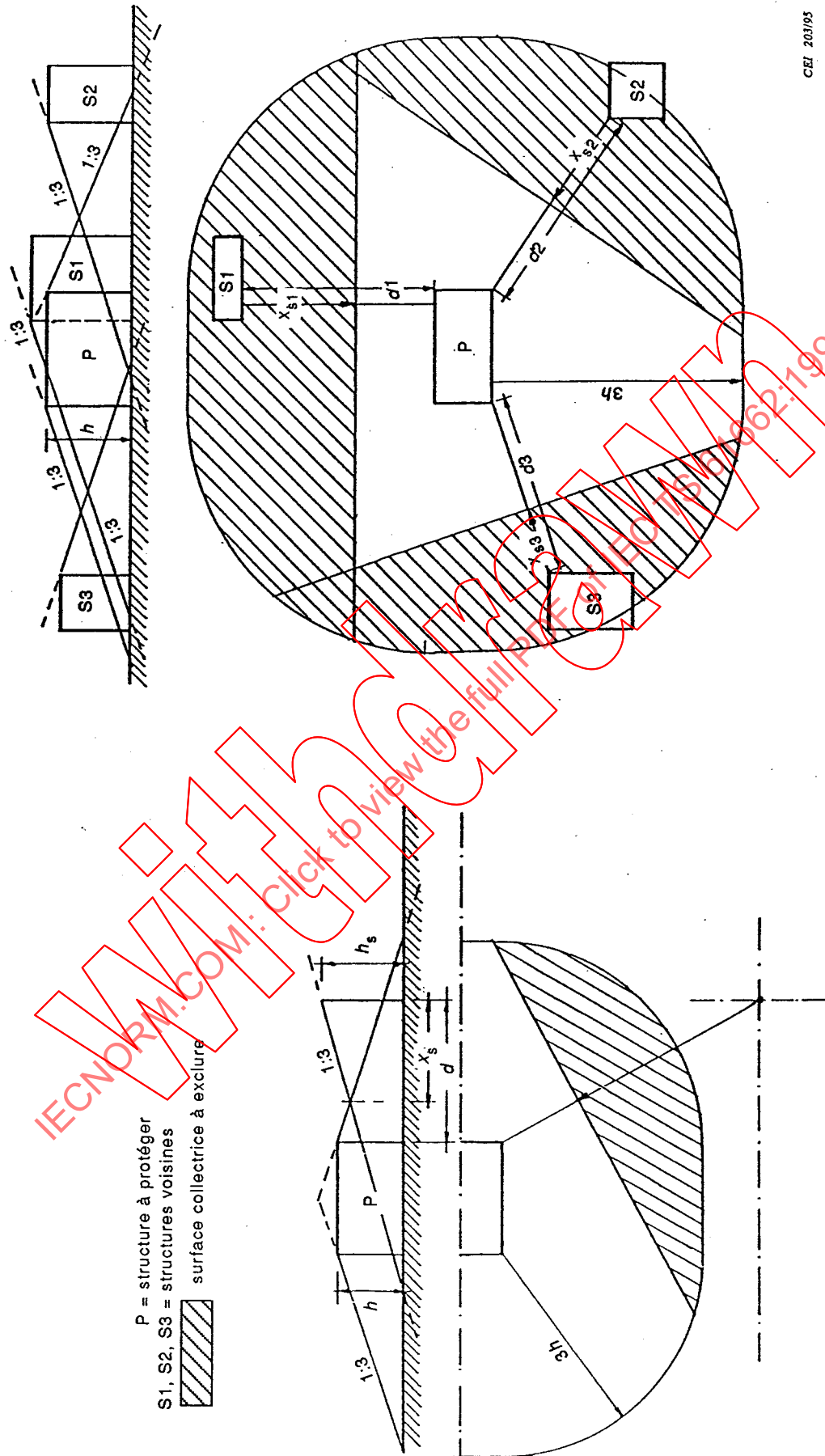
Figure 1 – Effective collection area A_e of a structure in flat terrain



CEI 202/95

Figure 2 – Surface collectrice effective A_e d'une structure en terrain accidenté

Figure 2 – Effective collection area A_e of a structure in uneven terrain



CEI 203/95

Figure 3 – Surface collectrice effective A_e d'une structure avec d'autres structures voisines

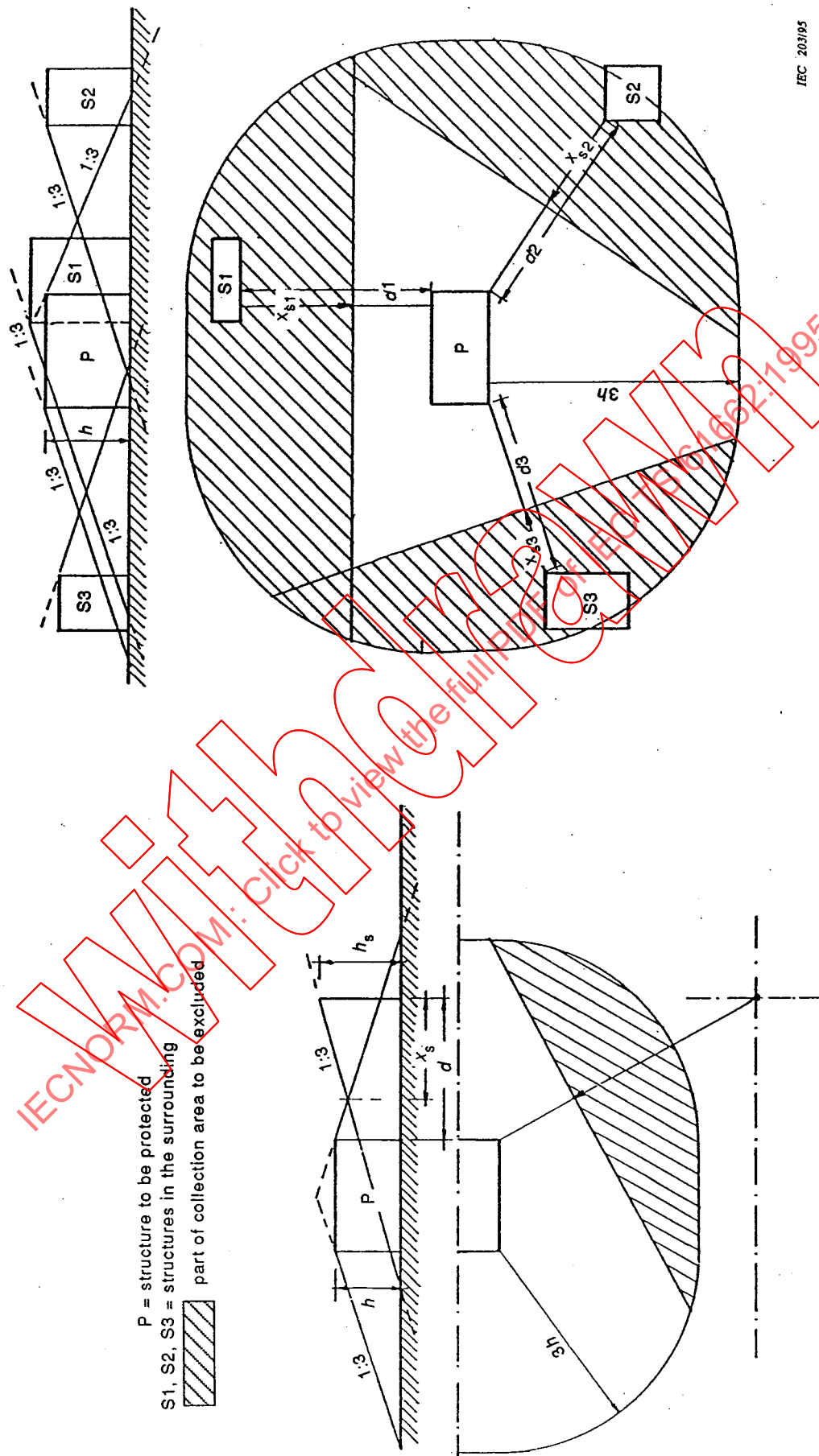
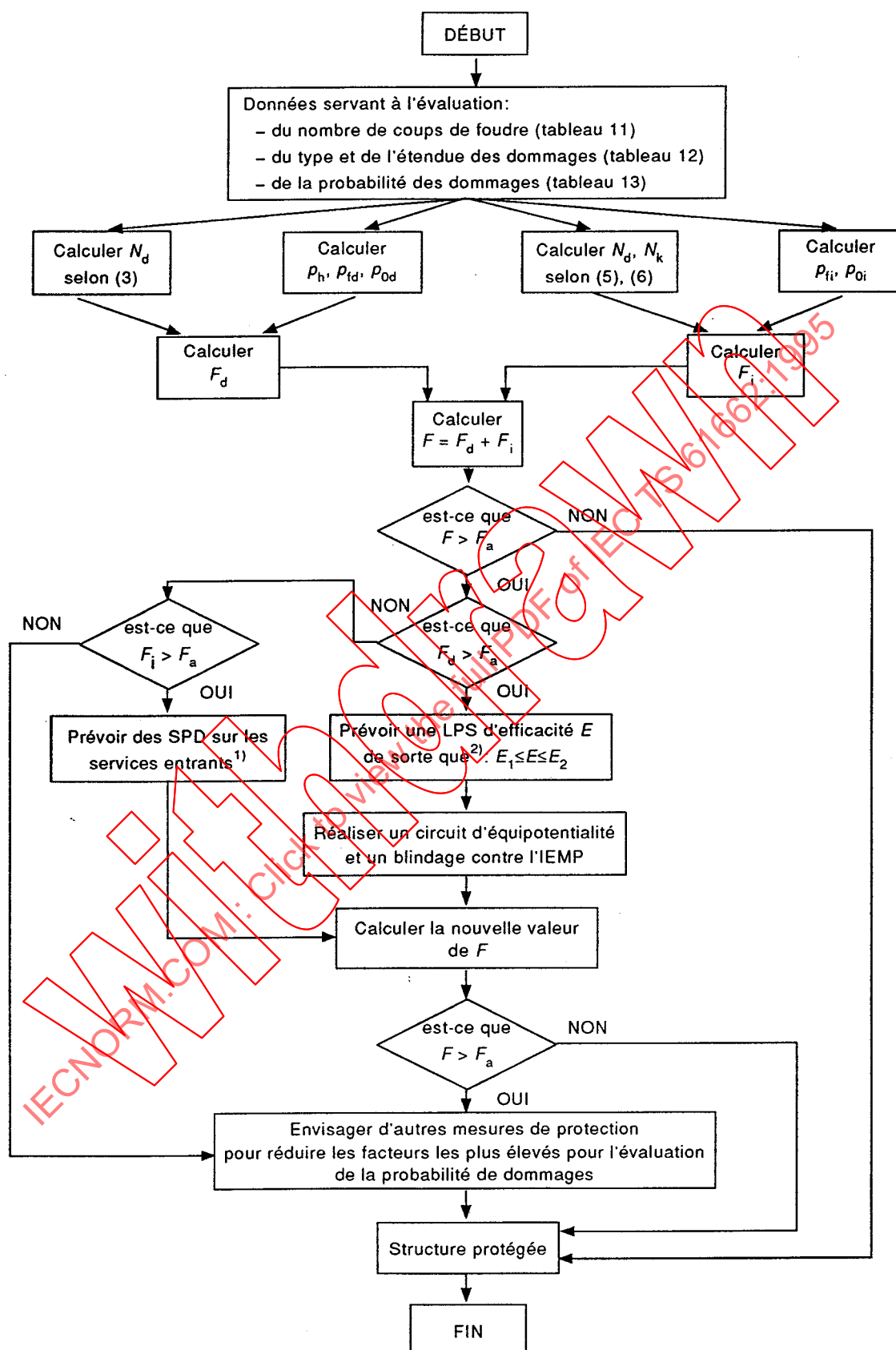


Figure 3 – Effective collection area A_e of a structure when there are others nearby



¹) En corrélation avec les règlements du CE 64 de la CEI.

²) Conformément aux équations (34), (35).

Figure 4 – Synoptique de sélection des mesures de protection

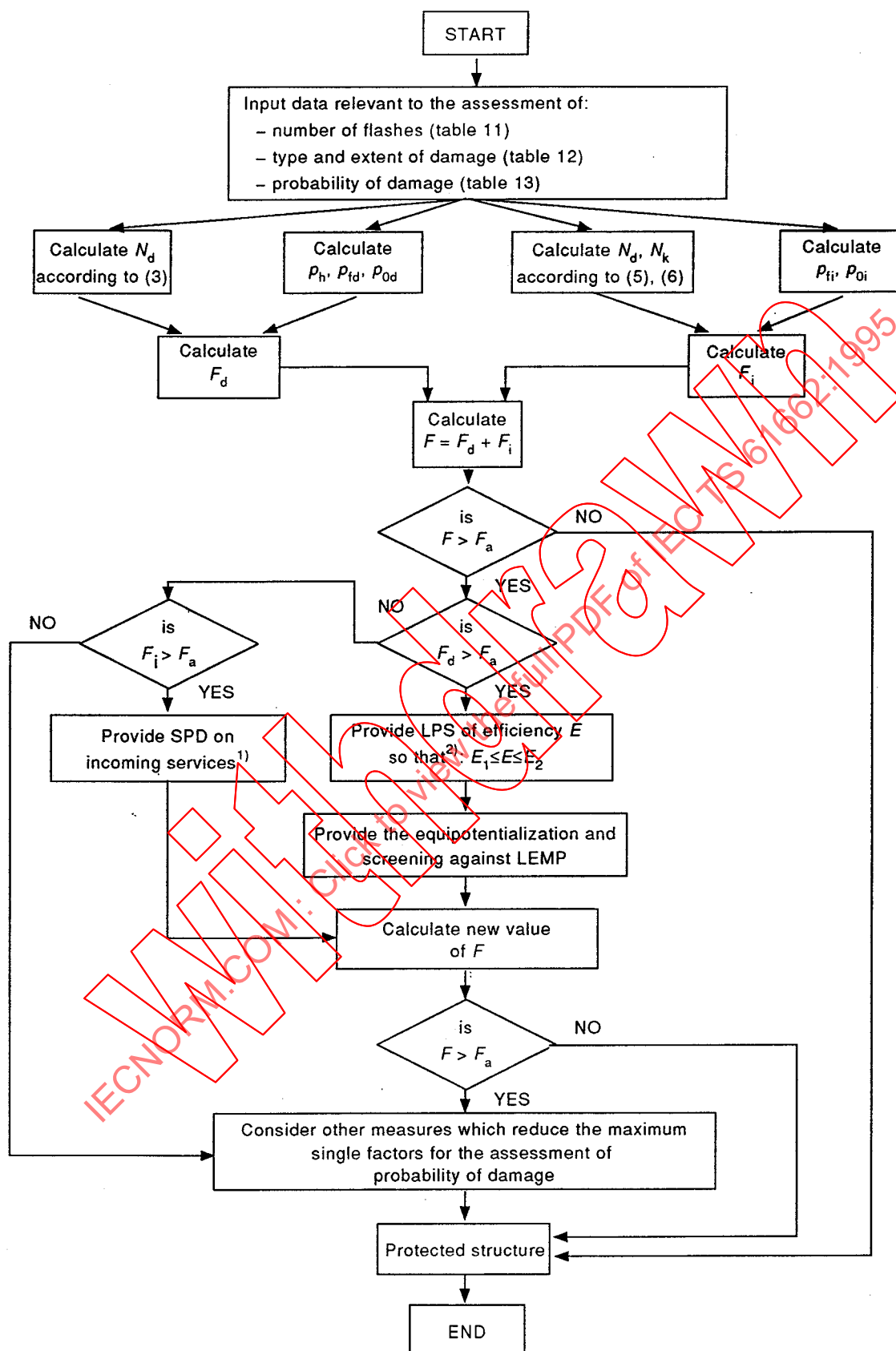


Figure 4 – Flow diagram for the selection of protective measures

Annexe A (informative)

Risque de choc

A.1 Généralités

Les dangers mortels représentés pour les êtres humains par les chocs électriques transitoires sont quantifiés dans la présente annexe.

Les situations où la victime est soumise à un coup de foudre direct ne sont pas prises en compte. Ne sont prises en compte que les situations dans lesquelles une personne est en contact avec un objet frappé par la foudre, ou à proximité de celui-ci. Dans de telles situations, une personne peut être exposée à:

- a) la tension de contact, si elle se trouve effectivement en contact avec l'objet frappé par la foudre;
- b) la décharge secondaire si elle se trouve à proximité de cet objet; dans ce cas, une partie du courant peut traverser l'air et se décharger à la terre à travers la victime;
- c) la tension de pas illustrée à la figure A.1a, si une personne est en contact, en général par les pieds, avec deux points du sol de potentiels différents.

La situation b), une fois que l'air a été court-circuité par la décharge, peut être traitée comme la situation a); le risque de choc peut donc être évalué de la même manière qu'en a) lorsque le risque de décharge dans l'air a été pris en compte.

A.1.1 Domaine d'application et objet

La présente annexe est applicable à l'évaluation du danger de dommage corporel dû à la tension de contact ou de pas lors d'un coup de foudre direct sur la structure et à la sélection de mesures de protection destinées à réduire le risque de choc.

A.1.2 Termes et définitions

Les définitions de la CEI 1024-1 s'appliquent, ainsi que les termes et définitions supplémentaires suivants:

A.1.2.1 longueur effective l_e : Longueur maximale de l'électrode de terre, mesurée à partir du point d'injection du courant, au delà de laquelle toute réduction supplémentaire de la résistance équivalente de terre est négligeable.

A.1.2.2 résistance de contact R_c : Résistance de contact d'un pied d'une personne sur la surface du sol.

A.1.2.3 tension de pas U_s : Différence de potentiel entre deux points du sol, espacés de 1 m, causée par le courant de foudre s'écoulant d'une prise de terre voisine (figure A.1a).

A.1.2.4 tension de contact U_t : Différence de potentiel entre la terre et le point le plus élevé qu'une personne normale peut atteindre, risquant ainsi de toucher un objet frappé par la foudre (figure A.1b).

Annex A (informative)

Risk of shock

A.1 General

Life hazard caused by transient electric stress on human beings are quantified in this annex.

Situations where the victim is subjected to a direct stroke are not considered. Only those situations are considered in which a person is in touch with, or adjacent to, an object which has been struck. In such situations, a person can be subjected to:

- a) the touch voltage, if he is actually in contact with the object which has been struck;
- b) the side flash if he is standing close by; in this case, a portion of the current may cross the air gap and discharge to earth through him;
- c) the step voltage as illustrated in figure A.1a, if a person is in touch, generally by his feet, with two points at different potential on the ground.

Situation b), after the gap has been short-circuited by the discharge, can be treated as situation a); it follows that the risk of shock can be assessed in the same manner as for a) when risk of breakdown of the air-gap has been taken into account.

A.1.1 Scope and object

This annex is applicable to the evaluation of the risk of personal injury due to touch and step voltage during a direct lightning flash to the structure and to the selection of protection measures to be provided in order to reduce the risk of shock.

A.1.2 Terms and definitions

All terms and definitions already defined in IEC 1024-1 are applicable to this annex as well as the following additional terms and definitions:

A.1.2.1 effective length l_e : The maximum length of the earth electrode, measured from the point of injection of the current, beyond which any further reduction in the equivalent earth resistance is negligible.

A.1.2.2 touch resistance R_c : The touch resistance of one foot of a person to a ground surface.

A.1.2.3 step voltage U_s : Potential difference between two points on the ground, 1 m apart, arising from lightning current flowing from an adjacent earth termination (figure A.1a).

A.1.2.4 touch voltage U_t : Potential difference between earth and the highest point at which a normal person is able to touch an object struck by lightning (figure A.1b).

A.2 Evaluation du risque de choc

A.2.1 Généralités

Le risque de choc est la probabilité p_h de dommage corporel causé par la tension de pas ou de contact due à la foudre frappant une structure au cours d'une année. Dans le cas d'une personne présente en permanence sur le site dangereux, le risque peut être évalué [10]* selon l'équation suivante:

$$p_h = \int_0^{\infty} g(E) \times P(E) dE \quad (A.1)$$

où

$g(E)$ est la densité de distribution des valeurs d'énergie sur le site dangereux dues aux tensions de contact et/ou de pas, calculée comme indiqué en A.2.2;

$P(E)$ est la distribution cumulée des valeurs d'énergie entraînant la fibrillation du corps humain en condition d'impulsion, calculée comme indiqué en A.2.3.

A.2.2 Densité de distribution des valeurs d'énergie causant le choc

La densité de distribution $g(E)$ des valeurs d'énergie est liée à la densité de distribution de l'énergie des coups de foudre $g(E^\pm)$:

$$g(E) = g(K E^\pm) \quad (A.2)$$

où

$E^\pm$ est l'énergie spécifique correspondant aux coups de foudre positifs et négatifs [11]; et

K un coefficient qui dépend des composantes de la tension de contact et de la tension de pas.

Ces composantes sont les suivantes:

- la composante de tension de contact induite dans la boucle créée par le conducteur descendant et le corps humain (voir figure A.1b). La valeur correspondante de K est donnée par:

$$K = K_{Lt} = 0,08 L_S^2 \frac{K_c^2 R_0}{(2 R_0 + R_c)^2} \quad (A.3)$$

- la composante résistive de la tension de contact due à la résistance équivalente de terre Z de l'électrode de terre (voir figure A.1b). La valeur correspondante de K est donnée par:

$$K = K_{Rt} = K_t^2 \frac{K_c^2 4 R_0 Z^2}{(2 R_0 + R_c)^2} \quad (A.4)$$

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie de l'annexe A, à l'article A.4.

A.2 Assessment of the risk of shock

A.2.1 General

The risk of shock is the probability p_h of personal injury by step or touch voltage due to lightning to a structure during one year. In the case of a person permanently present in the dangerous place the risk may be assessed [10]* according to the following equation:

$$p_h = \int_0^{\infty} g(E) \times P(E) dE \quad (\text{A.1})$$

where

$g(E)$ is the distribution density of energy values in the place of danger due to touch and/or step voltages, calculated as in A.2.2;

$P(E)$ is the cumulative distribution of the energy values causing fibrillation to the human body in impulse conditions, calculated as in A.2.3.

A.2.2 Distribution density of energy values causing shock

The distribution density $g(E)$ of energy values is related with distribution density of energy of lightning flashes $g(E^{\pm})$:

$$g(E) = g(K E^{\pm}) \quad (\text{A.2})$$

where

$E^{\pm}$ is the specific energy relevant to the positive and negative lightning flashes [11];
and

K is a coefficient depending on the components of touch and step voltages.

These components are:

- the component of touch voltage induced in the loop created by the down conductor and the human body (see figure A.1b). The relevant value of K is given by:

$$K = K_{Lt} = 0,08 L_S^2 \frac{K_c^2 R_0}{(2 R_0 + R_c)^2} \quad (\text{A.3})$$

- the resistive component of touch voltage due to equivalent earth resistance Z of ground electrode (see figure A.1b). The relevant value of K is given by:

$$K = K_{Rt} = K_1^2 \frac{K_c^2 4 R_0 Z^2}{(2 R_0 + R_c)^2} \quad (\text{A.4})$$

* Figures in square brackets refer to clause A.4, bibliography of annex A.

– la tension de pas due à la résistance équivalente de terre (voir figure A.1a). La valeur correspondante de K est donnée par:

$$K = K_{Rs} = K_S^2 \frac{K_c^2 R_0 Z^2}{(2 R_c + R_0)^2} \quad (\text{A.5})$$

où

K_c dépend de la configuration de l'installation de protection contre la foudre (IPS); pour les configurations illustrées en 3.2 et dans les figures 3, 4 et 5 de la CEI 1024-1, trois valeurs de K_c ont été prises en compte: 1; 0,66 et 0,44;

K_s est le coefficient de tension de pas, c'est-à-dire le rapport de la tension de pas U_s à la tension totale de terre U_T sur le site dangereux;

K_t est le coefficient de tension de contact, c'est-à-dire le rapport de la composante résistive de la tension de contact U_{Rt} à la tension totale U_T ;

NOTE – Les valeurs des coefficients K_s et K_t dépendent de la configuration et des dimensions de la prise de terre ainsi que de la position de la personne sur la surface du sol par rapport à l'électrode de terre. En première approximation, on suppose $K_s = K_t$, les valeurs typiques étant données dans le tableau A.1;

L_s est le coefficient d'induction d'une boucle définie par le corps humain et le conducteur descendant, en μH ;

Z est la résistance de terre équivalente de la prise de terre, définie en 1.2.15 de CEI 1024-1; elle est fonction de la résistivité de la terre, de la longueur et de la configuration de la prise de terre, du temps de montée et de la valeur crête du courant de foudre [12], [15],

R_0 est la résistance du corps humain. Comme indiqué dans la CEI 479, on suppose une valeur $R_0 = 500 \Omega$ pour l'évaluation du risque de choc;

R_c est la résistance de contact de la surface au sol d'un pied d'une personne; on suppose $R_c = 4 \rho_s$ où ρ_s est la résistivité de surface du sol [18], [20].

Tableau A.1 – Plage de valeurs approchées des coefficients de tension de pas et de contact $K_s = K_t$ pour la configuration de la prise de terre

Configuration de la prise de terre	Plage de valeurs $K_s = K_t$
En anneau	0,03 à 0,16
Maillée 10 m × 10 m	0,02 à 0,16
Maillée 5 m × 5 m	0,01 à 0,08

La densité de distribution de l'énergie des coups de foudre $g(E^\pm)$ dépend des distributions de densité log-normales des coups de foudre positifs et négatifs [19], dont la composition est basée sur les hypothèses suivantes:

- 1) la probabilité de coups de foudre positifs représente 10 % du nombre total des coups de foudre;
- 2) l'énergie totale des coups de foudre négatifs multiples est pratiquement concentrée dans le premier coup;

– the step voltage due to equivalent earth resistance (see figure A.1a). The relevant value of K is given by:

$$K = K_{Rs} = K_S \frac{K_c^2 R_0 Z^2}{(2 R_c + R_0)^2} \quad (\text{A.5})$$

where

K_c depends on the configuration of the lightning protection system (LPS); for the configurations as shown in 3.2 and in figures 3, 4, 5 of IEC 1024-1, three values of K_c have been assumed: 1; 0,66 and 0,44;

K_s is the step voltage coefficient which relates the step voltage U_s to the total earth voltage U_T in the place of danger;

K_t is the touch voltage coefficient which relates the resistive component of touch voltage U_{Rt} to the total voltage U_T ;

NOTE – The values of the coefficients K_s and K_t depend on the earth termination configuration and dimensions as well as on the person's position on the ground surface relative to the earth electrode. For the first approximation, it is assumed $K_s = K_t$ with typical values as given in table A.1;

L_s is the inductive coefficient of a loop defined by the human body and the down conductor in μH ;

Z is the equivalent earth resistance of the earth termination, as defined in 1.2.15 of IEC 1024-1, which is a function of earth resistivity, the length and the configuration of the earth termination, the rise time and the peak value of the lightning current [12], [15];

R_0 is the resistance of the human body. As suggested in IEC 479, the value of $R_0 = 500 \Omega$ is assumed for the purpose of assessing the risk of shock;

R_c is the resistance of touch to the ground surface of one foot of a person; it is numerically assumed $R_c = 4 \rho_s$ where ρ_s is the surface resistivity of the soil [18], [20].

Table A.1 – Approximated range of values of step and touch voltage coefficients $K_s = K_t$ for earth termination configuration

Earth termination configuration	Range of values $K_s = K_t$
Ring	0,03 to 0,16
Mesh 10 m × 10 m	0,02 to 0,16
Mesh 5 m × 5 m	0,01 to 0,08

The distribution density of energy of lightning flashes $g(E^\pm)$ depends on log-normal density distributions of positive and negative flashes [19], the composition of which is based on the following assumptions:

- 1) the probability of positive flashes is 10 % of the total flashes;
- 2) the whole energy of the multiple negative strokes is practically concentrated in the first stroke;

3) les valeurs de résistance équivalente de terre de la prise de terre correspondant à la durée transitoire typique d'un coup de foudre positif (Z^+) sont égales à presque la moitié des valeurs de résistance correspondant aux durées typiques du premier coup de foudre négatif (Z^-), [12], [21], [22], [23], et on suppose que la relation est représentée par l'expression suivante:

$$\left(\frac{Z^+}{Z^-} \right)^2 = 0,25 \quad (\text{A.6})$$

Dans cette hypothèse, la distribution $g(E^\pm)$ peut être obtenue par la distribution cumulée de l'énergie des coups de foudre $G(E^\pm)$, en pondérant la probabilité de coups de foudre positifs par un facteur de 0,25 comme suit:

$$G(E^\pm) = 0,9 G(E^-) + 0,1 G\left(\frac{E^+}{0,25}\right) \quad (\text{A.7})$$

où

E^+ est l'énergie spécifique des coups de foudre positifs;

E^- est l'énergie spécifique des coups de foudre négatifs.

Dans la figure A.2, la distribution exprimée par (A.7) est illustrée, en supposant pour $G(E^-)$ et $G(E^+)$ les distributions indiquées dans la CEI 1024-1-1.

A.2.3 Distribution cumulée des valeurs d'énergie entraînant la fibrillation

La distribution cumulée des valeurs d'énergie entraînant la fibrillation pour les courants d'impulsion dont la durée est de 0,1 ms à 10 ms pour un écoulement de la main vers le pied, est donnée à la figure A.3 (voir la CEI 479 et [13], [14]).

Une telle distribution présente un caractère normal et est donnée par:

$$P(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^E \exp\left[-\frac{(E - E_m)^2}{2\sigma^2}\right] dE \quad (\text{A.8})$$

où

$E_m = 20 \text{ J}$ et $\sigma = 0,37$ sont respectivement la moyenne et l'écart type de la distribution pour un courant d'impulsion s'écoulant dans le corps humain avec une résistance $R_0 = 500 \Omega$.

On peut supposer la même distribution pour un écoulement du courant d'un *pied* à l'*autre*.

Les effets sur le corps humain d'une série d'impulsions de courant, associées à un courant continu comme dans le cas du coup de foudre, ne sont pas encore connus. Toutefois, la distribution (A.8) peut être appliquée dans le cas du coup de foudre en considérant que:

- la totalité de l'énergie de coups de foudre négatifs multiples est concentrée dans le premier coup de foudre, dont le double du temps à la mi-valeur est inférieur à 0,2 ms dans 5 % des cas seulement;
- la durée totale des impulsions subséquentes est inférieure à 10 ms;
- l'énergie totale d'un coup de foudre positif est concentrée dans sa partie impulsive;
- la durée du courant d'impulsion d'un coup de foudre positif n'est supérieure à 10 ms que dans quelques cas (0,3 % environ).

3) the equivalent earth resistance values of earth termination related to the transient duration typical of a positive flash (Z^+) are almost one-half of the resistance values related to the durations typical of first negative stroke (Z^-), [12], [21], [22], [23] and the relationship is assumed to be represented by the following expression:

$$\left(\frac{Z^+}{Z^-} \right)^2 = 0,25 \quad (\text{A.6})$$

In this assumption, distribution $g(E^\pm)$ may be obtained by the cumulative distribution of lightning flashes energy $G(E^\pm)$, weighting the probability of positive flashes by a factor 0,25 as follows:

$$G(E^\pm) = 0,9 G(E^-) + 0,1 G\left(\frac{E^+}{0,25}\right) \quad (\text{A.7})$$

where

E^+ is the specific energy of positive flashes;

E^- is the specific energy of first negative strokes.

In figure A.2 the distribution expressed by (A.7) is shown assuming for $G(E^-)$ and $G(E^+)$ the distributions reported in IEC 1024-1-1.

A.2.3 Cumulative distribution of the energy values which cause fibrillation

The cumulative distribution of energy values which cause fibrillation for impulse current, lasting between 0,1 ms and 10 ms, flowing in the path from hand to foot of the body is given in figure A.3 (see IEC 479 and [13], [14]).

Such a distribution has a normal character and is given by:

$$P(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^E \exp\left[-\frac{(E - E_m)^2}{2\sigma^2}\right] dE \quad (\text{A.8})$$

where

$E_m = 20 \text{ J}$ and $\sigma = 0,37$ are the average and the standard deviation values of the distribution for an impulse current flowing in the human body having a resistance $R_0 = 500 \Omega$.

The same distribution could be assumed for a current path *foot to foot* of the body.

The effects on the human body of a series of current impulses, associated with a continuing current as in the case of lightning, are not yet known. Nevertheless the distribution (A.8) may be applied in the case of lightning taking into account:

- the whole energy of negative multiple strokes is concentrated on the first stroke whose double time to half-value is less than 0,2 ms for only 5 % of cases;
- the whole duration of subsequent impulses is less than 10 ms;
- the whole energy of a positive flash is concentrated in its impulsive part;
- the duration of the impulse current from positive flash is greater than 10 ms only in few cases ($\approx 0,3 \%$).

A.3 Mesures destinées à la réduction du risque de choc

Le risque de choc par les tensions de contact et de pas peut être réduit en modifiant [24]:

- le nombre de conducteurs de descente;
- le couplage électromagnétique avec les conducteurs dans lesquels s'écoule le courant de foudre;
- la résistance équivalente de terre et la configuration de la prise de terre;
- les caractéristiques de la surface du sol.

Dans le cas des installations de terre de type A, le courant d'impulsion I ionise le sol, de sorte qu'autour de l'électrode une zone ionisée de rayon x (voir [16], [17]) donnée par:

$$x = 2,6 \times 10^{-2} \times \rho^{0,4} \sqrt{I K_c} \quad (\text{en m} \times \Omega \text{ m} \times \text{kA}) \quad (\text{A.9})$$

peut être identifiée et considérée équipotentielle; cela signifie que pour les besoins de l'évaluation du choc, la tension de pas à l'intérieur de cette zone est négligeable.

Tableau A.2 – Probabilité de choc par tension de contact en fonction de la configuration des conducteurs de descente et valeurs dérivées de K_c

ρ_h %	20	10	9	5	1	0,5	0,1
d_c/h	2,2	1,2	1	0,68	0,2	0,15	0,06
$K_c \approx 0,44(d_c/h)^{1/3}$	0,57	0,47	0,44	0,39	0,26	0,23	0,17
NOTES 1 d_c est la distance entre deux conducteurs de descente. 2 h est la longueur du conducteur de descente entre le capteur et le point de liaison équipotentielle le plus proche.							

En ce qui concerne la zone située à l'extérieur de la zone d'ionisation, la probabilité de choc par la tension de pas peut être réduite en diminuant la valeur de K_c ou en augmentant la résistivité de surface ρ_s du sol, comme on peut le déduire de la figure A.4.

Dans la zone d'ionisation, la tension de contact est principalement déterminée par la composante inductive de la tension de contact.

Afin de réduire la probabilité de choc par la tension de contact, il est nécessaire:

- a) de réduire la valeur de K_c (voir figure A.5);
- b) d'appliquer un isolant adéquat sur le conducteur de descente, par exemple en le faisant passer dans un tuyau en PVC;
- c) d'appliquer un matériau isolant afin d'augmenter la résistivité de surface du sol.

En ce qui concerne la condition a), de faibles valeurs de probabilité de choc ne peuvent être obtenues qu'en réduisant à de très faibles valeurs la distance entre conducteurs de descente (voir tableau A.2).

A.3 Measures for reducing the risk of shock

The risk of shock by touch and step voltage may be reduced by modifying [24]:

- the number of down conductors;
- the electromagnetic coupling with the conductors in which the lightning current flows;
- the equivalent earth resistance and configuration of the earth termination; and
- the soil surface characteristics.

In the case of type A earthing arrangements the impulse current I ionizes the soil, so that around the electrode an ionized zone with radius, x , (see [16], [17]) given by:

$$x = 2,6 \times 10^{-2} \times \rho^{0,4} \sqrt{I K_c} \quad (\text{in m} \times \Omega \text{ m} \times \text{kA}) \quad (\text{A.9})$$

can be identified and assumed to be as equipotential: it means that for the aim of shock assessment, the step voltage inside this zone is negligible.

Table A.2 – Probability of shock by touch voltage as a function of down conductors configuration and derived values of K_c

ρ_h %	20	10	9	5	1	0,5	0,1
d_c/h	2,2	1,2	1	0,68	0,2	0,15	0,06
$K_c = 0,44(d_c/h)^{1/3}$	0,57	0,47	0,44	0,39	0,26	0,23	0,17
NOTES 1 d_c is the distance between two down conductors. 2 h is the length of the down conductor from the air termination to the nearest equipotential bonding point.							

For the zone outside the ionization area, the probability of shock by step voltage can be reduced by decreasing the value of K_c or by increasing the surface resistivity ρ_s of the soil as can be deduced from figure A.4.

In the ionization zone, the touch voltage is determined primarily by the inductive component of touch voltage.

In order to reduce the probability of shock by touch voltage it is necessary:

- a) to reduce the value of K_c (see figure A.5);
- b) to apply adequate insulation to the down conductor, for example enclosing it within a PVC pipe;
- c) by the application of the insulating material to increase the surface resistivity of soil.

In condition a) low values of probability of shock can be obtained only by reducing to very small values the distance between down conductors (see table A.2).

En ce qui concerne la condition b), une épaisseur de 3 mm d'isolant PVC convient dans tous les cas (voir tableau A.3).

En ce qui concerne la condition c), les valeurs minimales de résistivité de surface du sol ρ_s à obtenir pour limiter la probabilité de choc sont données dans le tableau A.4.

Tableau A.3 – Epaisseur minimale (en millimètres) de l'isolant PVC en fonction des niveaux de protection de l'IPF et des valeurs de K_c

K_c Niveau de protection de l'IPF	1	0,66	0,44
I	3	2	1,5
II	2	1,5	1
III–IV	1,5	1	0,7

Tableau A.4 – Valeurs minimales de ρ_s et R_c pour limiter la probabilité p_h de choc par tension de contact

p_h %	9	5	1	0,5	0,1
ρ_s Ωm	0	60	300	400	700
R_c Ω	0	230	1 200	2 500	2 900

Dans le cas des installations de mise à la terre de type B, le danger par tension de pas peut être limité.

- a) en augmentant le rapport ρ_s/Z ;
- b) en diminuant la valeur du produit $K_c K_s$.

La condition a) peut être remplie en augmentant ρ_s . La figure A.6 peut aider à déterminer la valeur minimale de la résistivité de surface du sol à obtenir.

La réduction de Z est souvent impraticable pour des raisons techniques et économiques.

La condition b) peut être remplie par réduction de K_c et de K_s . Pour la réduction de K_c , il convient d'accroître le nombre de conducteurs de descente et de réduire la distance entre eux à des valeurs très faibles afin d'obtenir des résultats satisfaisants; voir le cas précédent (installations de mise à la terre de type A). Pour la réduction de K_s , il convient de réduire la taille des mailles du réseau de prise de terre. Cette mesure de protection est coûteuse et peu efficace.

For condition b), a thickness of 3 mm of PVC insulation is adequate in every case (see table A.3).

For condition c), the minimum values of surface soil resistivity ρ_s to be achieved, in order to limit the probability of shock, are shown in table A.4.

Table A.3 – Minimum thickness, in millimetres, of PVC insulation relating to levels of protection of LPS and values of K_c

K_c Level of protection of LPS	1	0,66	0,44
I	3	2	1,5
II	2	1,5	1
III–IV	1,5	1	0,7

Table A.4 – Minimum values of ρ_s and R_c to limit the probability p_h of shock by touch voltage

p_h %	9	5	1	0,5	0,1
ρ_s Ωm	0	60	300	400	700
R_c Ω	0	230	1 200	2 500	2 900

In the case of type B earthing arrangements the hazard by step voltage can be limited by:

- increasing the ratio ρ_s/Z ;
- decreasing the value of the product $K_c K_s$.

Condition a) can be fulfilled by increasing ρ_s . Figure A.6 may help in determining the minimum value of surface resistivity of the soil to be achieved.

Reduction of Z is often not convenient for technical and economic reasons.

Condition b) can be achieved by reduction of K_c and K_s . For the reduction of K_c the number of down conductors should be increased and the distance between them should be reduced to a very small values in order to obtain satisfactory results; see the previous case (type A earthing arrangements). For reduction of K_s the mesh size of the earth termination network should be reduced. This protective measure is expensive and it is not very efficient.

En ce qui concerne le danger dû à la tension de contact, le danger peut être limité en augmentant la résistivité de surface ρ_s du sol (voir figure A.7); en diminuant la valeur de Z (voir figure A.7); en augmentant le nombre de conducteurs de descente; en diminuant la taille des mailles du réseau de prise de terre.

Les valeurs minimales de résistivité de surface du sol ρ_s pour limiter à 1 % la probabilité de choc dû aux tensions de pas et de contact sont présentées dans le tableau A.5.

Tableau A.5 – Valeurs minimales de ρ_s correspondant à une probabilité de 1 % de choc par tensions de pas et de contact pour les deux types de configuration standard de l'électrode de terre

Configuration de l'électrode de terre	A	B
Tension de pas	$\rho_s \geq 1\,200\, \rho^{0,215}$	$\rho_s \geq 140\, K_c\, Z$
Tension de contact	$\rho_s \geq 1\,250\, K_c - 250$	$\rho_s \geq 400\, K_c\, Z - 250$

Les valeurs de résistance équivalente de terre Z de la prise de terre à insérer dans le tableau A.5 pour les électrodes de type B sont données dans le tableau A.6. Ces valeurs sont données pour diverses valeurs de résistivité de sol ρ [12], [24] et divers niveaux de protection de l'IPF en fonction de la longueur des électrodes de terre de la figure 2 de la CEI 1024-1.

Tableau A.6 – Valeurs de résistance équivalente de terre Z en fonction de la résistivité du sol ρ et des niveaux de protection

ρ Ωm	Z Ω Niveaux de protection	
	I	II à IV
100	4	4
200	6	6
500	10	10
1 000	10	20
2 000	10	40
3 000	10	60

En l'absence d'une IPF, les valeurs estimées de probabilité de choc par tensions de pas et de contact sont données dans le tableau 4 du présent rapport technique.

A.4 Bibliographie de l'annexe A

- [10] Flisowski Z., Mazzetti C.: "An approximate method of assessment of the electric shock hazard by lightning strike". 18th ICLP (1985), Munich.
- [11] Uman M.A.: "The Lightning Discharge". Academic Press, INC. Orlando 1987.

As far as the hazard due to touch voltage is concerned, the hazard can be limited by: increasing the surface resistivity ρ_s of the soil (see figure A.7); decreasing the value of Z (see figure A.7); increasing the number of down conductors; and decreasing the mesh size of earth termination network.

The minimum values of soil surface resistivity ρ_s to limit the probability of shock to 1 %, due to step and touch voltages, are presented in table A.5.

Table A.5 – Minimum values of the surface resistivity of the soil ρ_s relating to 1 % probability of shock by step and touch voltages for the two types of standard earth electrode configuration

Earth electrode configuration	A	B
Step voltage	$\rho_s \geq 1\,200 \rho^{0,215}$	$\rho_s \geq 140 K_c Z$
Touch voltage	$\rho_s \geq 1\,250 K_c - 250$	$\rho_s \geq 400 K_c Z - 250$

The values of equivalent earth resistance Z of earth termination to be inserted in table A.5 for type B electrodes are given in table A.6. These values are given for various values of soil resistivity ρ [12], [24] and protection levels of LPS which are related to the length of earth electrodes in figure 2 of IEC 1024-1.

Table A.6 – Values of equivalent earth resistance Z relating to soil resistivity ρ and protection levels

ρ Ωm	Z Ω Protection levels	
	I	II to IV
100	4	4
200	6	6
500	10	10
1 000	10	20
2 000	10	40
3 000	10	60

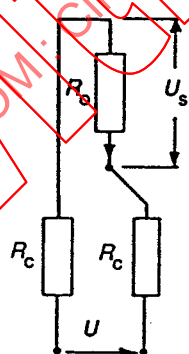
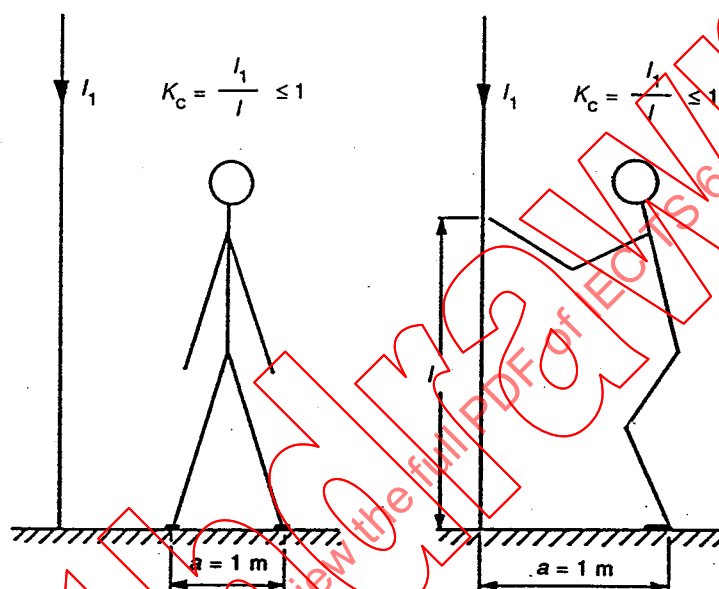
In the absence of an LPS the estimated values of shock probability by step and touch voltages are given in table 4 of this technical report.

A.4 Bibliography of annex A

- [10] Flisowski Z., Mazzetti C.: "An approximate method of assessment of the electric shock hazard by lightning strike". 18th ICLP (1985), Munich.
- [11] Uman M.A.: "The Lightning Discharge". Academic Press, INC. Orlando 1987.

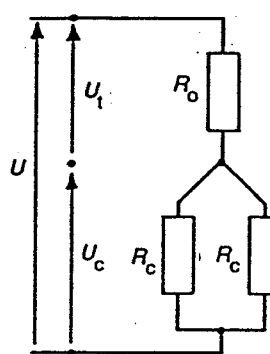
- [12] L. Dellerà, E. Garbagnati, G.B. Lo Piparo, R. Pomponi, P. Ronchetti, G. Solbiati: "Lightning protection of structures". L'Energia Elettrica, vol. 62, no. 11, 1985.
- [13] Dalziel Ch. F.: "A study of the hazards of impulse currents". AIEE Trans., Part III, Power Apparatus and Systems, vol. 72, 1953, pp. 1032-1043.
- [14] Biegelmeier G., Homberger E.: "Effets des courants d'impulsions unipolaires sur le corps humain". Bull. ASE, vol. 74, 1983, no. 22, p. 1298.
- [15] Vainer A.L.: "Impulse characteristics of complex earth grids". Electrical Technology (en russe) (in russian), vol. I, 1966.
- [16] Popolansky F.: "Determination of impulse characteristics of concentrated earth electrodes". CIGRE, SC 33-86 (WG 1), August 1986.
- [17] Oettle E.E.: "A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes". IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 4, October 1988, pp. 2020-2029.
- [18] Cataliotti V.: "Analisi sperimentale di modelli di dispersori di terra per stazioni elettriche". L'Elettrotecnica, Ottobre 1968.
- [19] Berger K., Anderson R.B., Kroninger H.: "Parameters of lightning flashes". Electra no. 41, 1975, pp. 23-37.
- [20] Carrescia V.: "Fondamenti di sicurezza elettrica. Valutazione dei rischi e analisi dei sistemi di protezione". Edit. Hoepli, Milan, 1984.
- [21] Wiesinger J.: "Zur Berechnung des Stosserdungswiderstandes in Tiefen-und Oberflächenerdern". Etz-a, Bd 99, 1978.
- [22] Gupta B.R., Thapar B.: "Impulse impedance of grounding grids". IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-99, n. 6, 1980.
- [23] Kosztaluk R., Loboda M., Mukhedkar D.: "Experimental study of transient ground impedance". Paper n. 399-5 presented at IEEE-PES 1981, Summer Meeting, Portland, July 1981.
- [24] Lo Piparo G.B., Mazzetti C.: "Dimensionamento dell'impianto di terra per correnti ad impulso. La riduzione del rischio per le persone e per gli impianti". Symposium on "Earth Termination Installations". Palermo, December 1990 and Bari, October 1991.

- [12] L. Dellerà, E. Garbagnati, G.B. Lo Piparo, R. Pomponi, P. Ronchetti, G. Solbiati: "Lightning protection of structures". *L'Energia Elettrica*, vol. 62, no. 11, 1985.
- [13] Dalziel Ch. F.: "A study of the hazards of impulse currents". *AIEE Trans.*, Part III, *Power Apparatus and Systems*, vol. 72, 1953, pp. 1032-1043.
- [14] Biegelmeier G., Homberger E.: "Effets des courants d'impulsions unipolaires sur le corps humain". *Bull. ASE*, vol. 74, 1983, no. 22, p. 1298.
- [15] Vainer A.L.: "Impulse characteristics of complex earth grids". *Electrical Technology (en russe) (in russian)*, vol. I, 1966.
- [16] Popolansky F.: "Determination of impulse characteristics of concentrated earth electrodes". *CIGRE*, SC 33-86 (WG 1), August 1986.
- [17] Oettle E.E.: "A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 3, no. 4, October 1988, pp. 2020-2029.
- [18] Cataliotti V.: "Analisi sperimentale di modelli di dispersori di terra per stazioni elettriche". *L'Elettrotecnica*, Ottobre 1968.
- [19] Berger K., Anderson R.B., Kroninger H.: "Parameters of lightning flashes". *Electra* no. 41, 1975, pp. 23-37.
- [20] Carrescia V.: "Fondamenti di sicurezza elettrica. Valutazione dei rischi e analisi dei sistemi di protezione". Edit. Hoepli, Milan, 1984.
- [21] Wiesinger J.: "Zur Berechnung des Stosserdungswiderstandes in Tiefen-und Oberflächenerdern". *Etz-a*, Bd 99, 1978.
- [22] Gupta B.R., Thapar B.: "Impulse impedance of grounding grids". *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-99, n. 6, 1980.
- [23] Koszaluk R., Loboda M., Mukhedkar D.: "Experimental study of transient ground impedance". Paper n. 399-5 presented at IEEE-PES 1981, Summer Meeting, Portland, July 1981.
- [24] Lo Piparo G.B., Mazzetti C.: "Dimensionamento dell'impianto di terra per correnti ad impulso. La riduzione del rischio per le persone e per gli impianti". Symposium on "Earth Termination Installations". Palermo, December 1990 and Bari, October 1991.



CEI 204/95

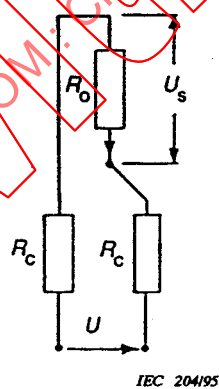
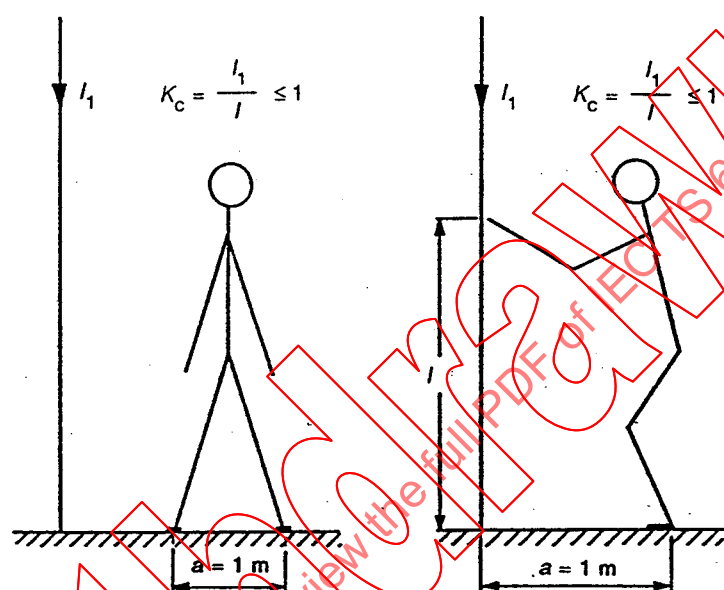
Figure A.1a



CEI 205/95

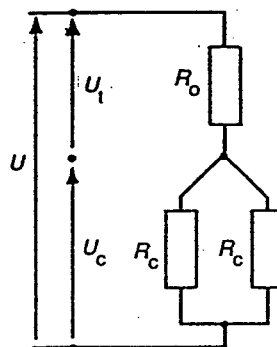
Figure A.1b

Figure A.1 – Circuits équivalents pour tension de pas et tension de contact



IEC 204/95

Figure A.1a



IEC 205/95

Figure A.1b

Figure A.1 – Equivalent circuits for step and touch voltages

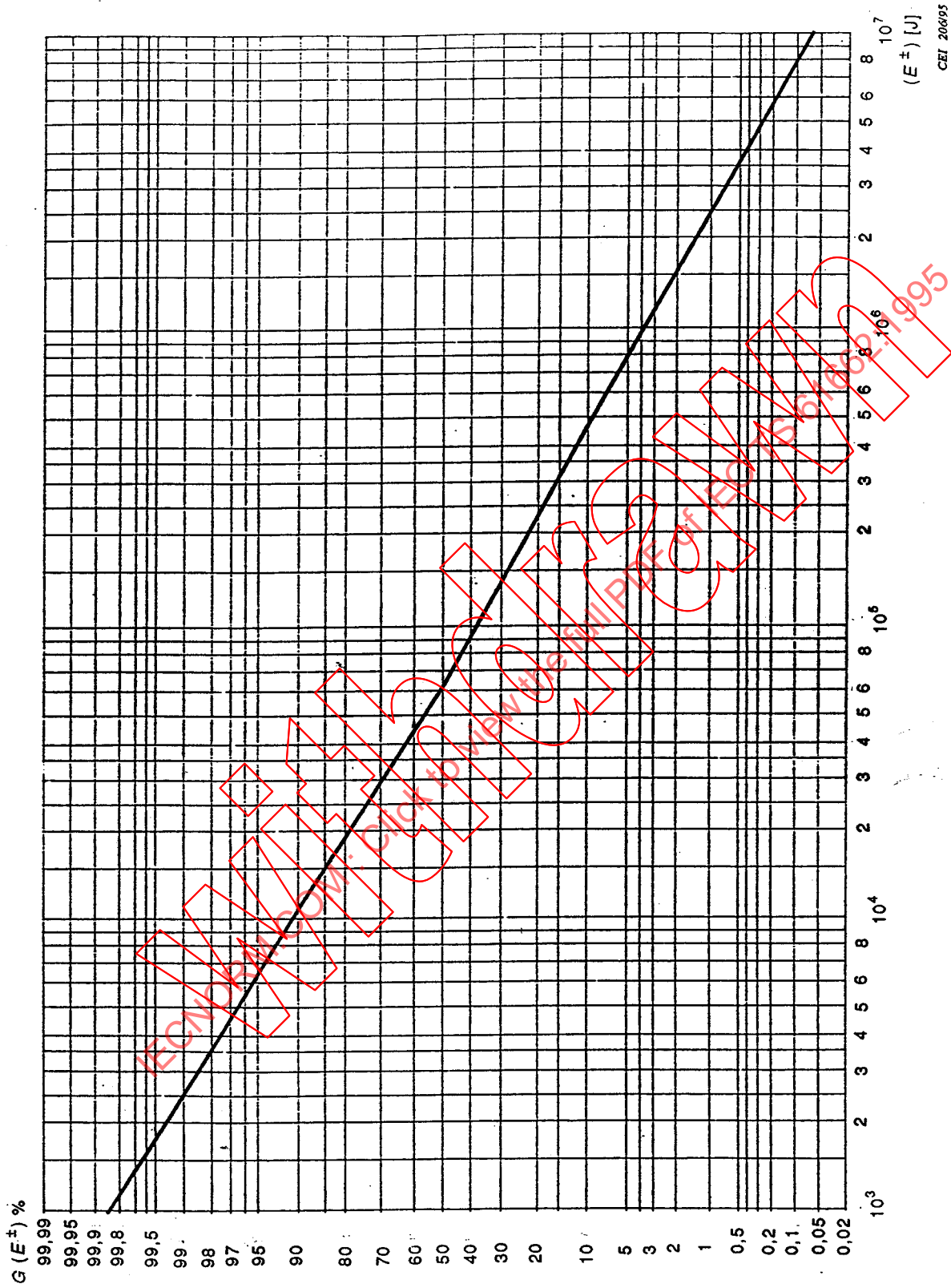


Figure A.2 – Distribution cumulée des valeurs d'énergie des coups de foudre pondérées selon l'équation (A.7)

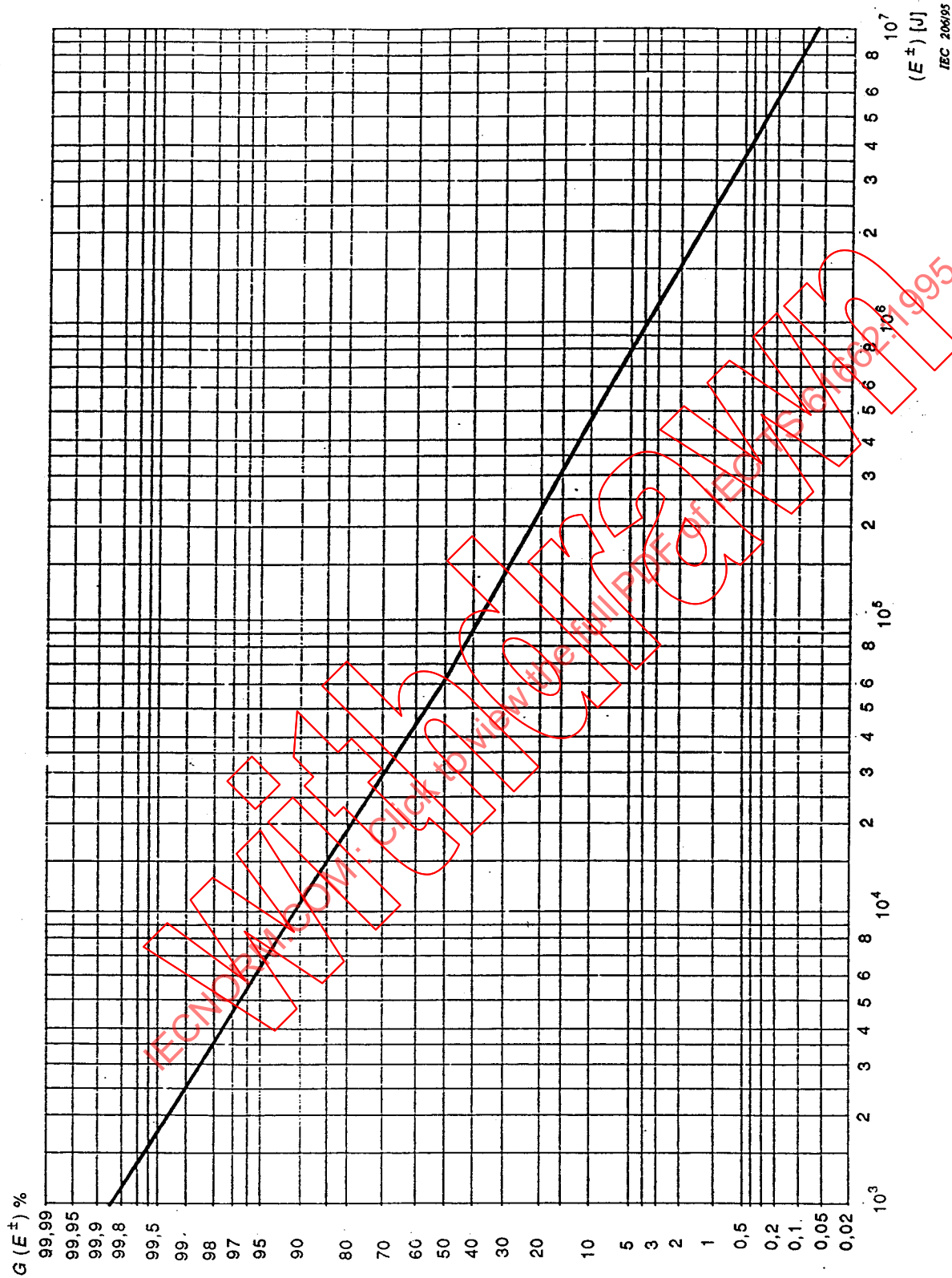


Figure A.2 – Cumulative distribution of the energy values of lightning flashes weighted in accordance with equation (A.7)

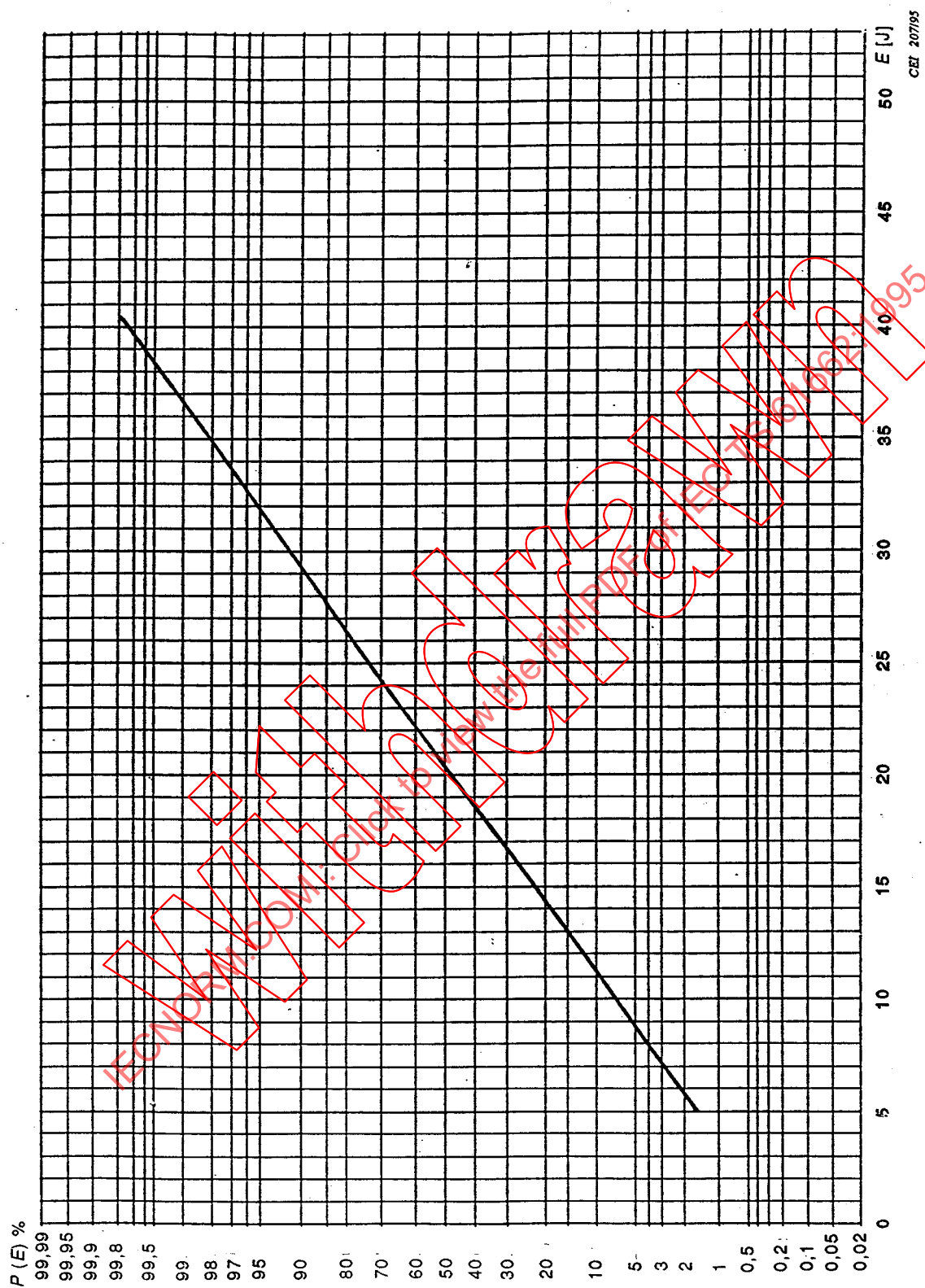


Figure A.3 – Distribution cumulée des valeurs d'énergie causant la fibrillation en conditions d'impulsion

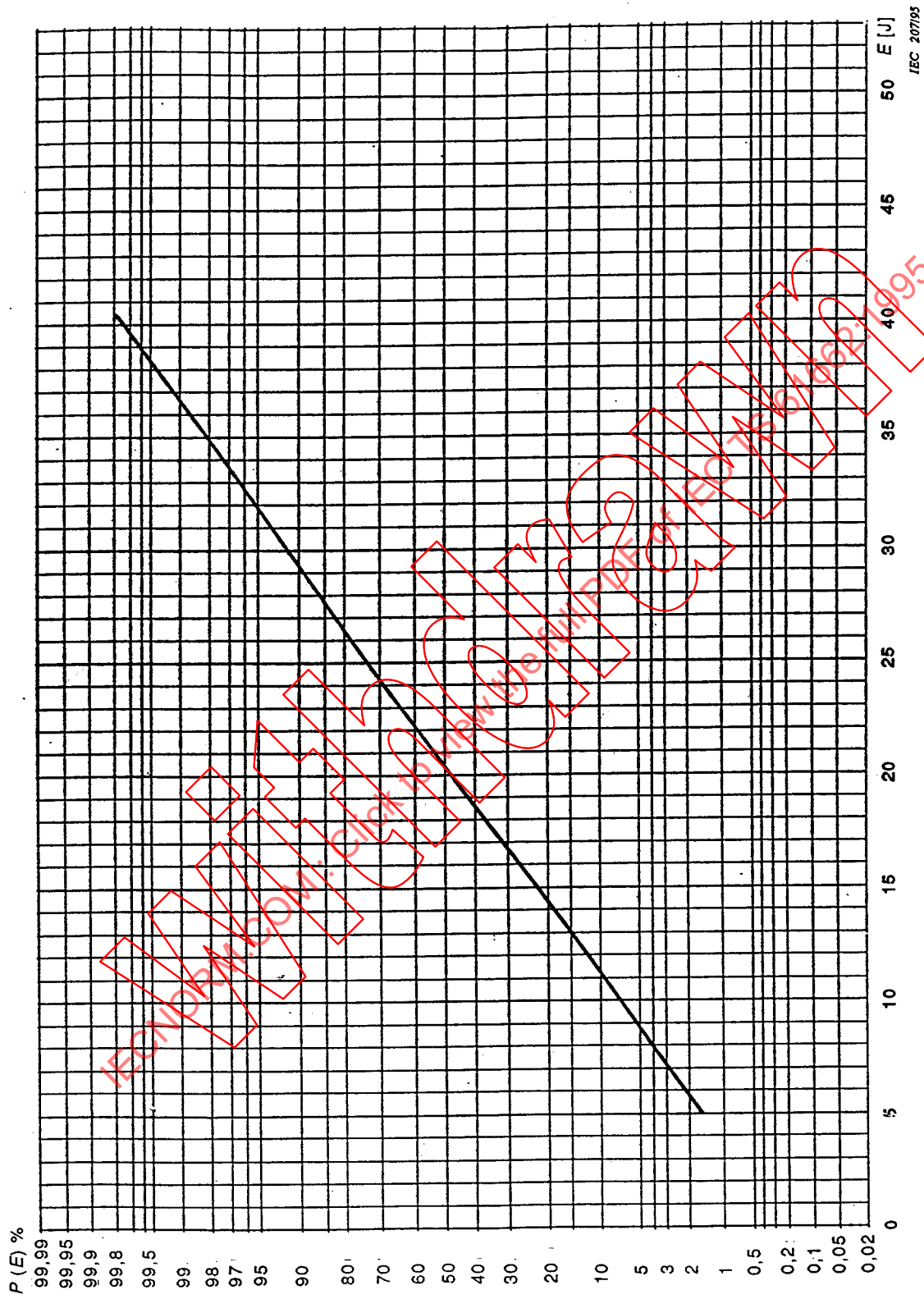


Figure A.3 – Cumulative distribution of the energy values causing fibrillation under impulse conditions

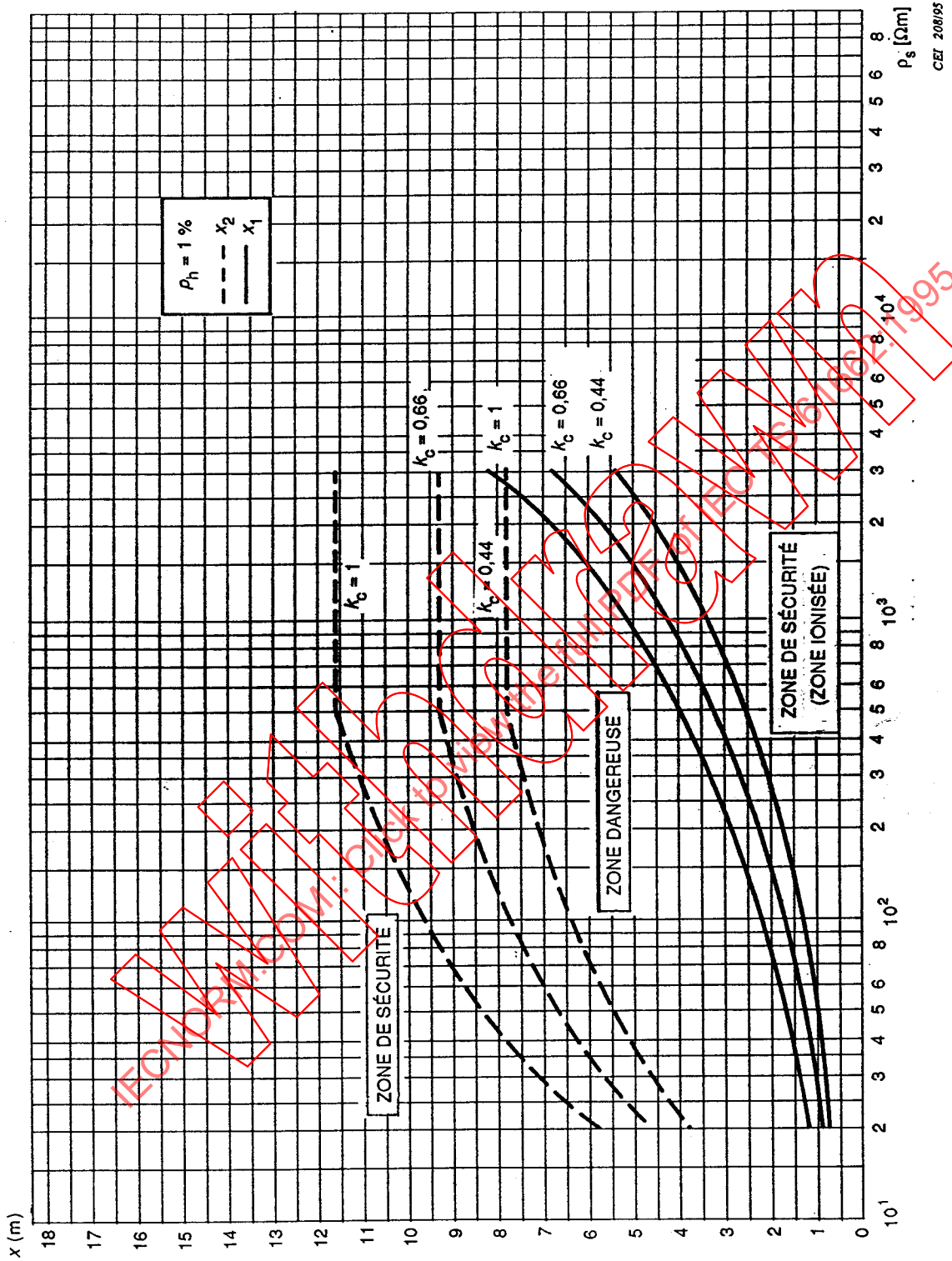


Figure A.4 – Installations de mise à la terre de type A. Limites x_1 et x_2 de la zone dangereuse pour tension de pas, pour diverses valeurs de K_c et pour une probabilité donnée de $\rho_h = 1\%$

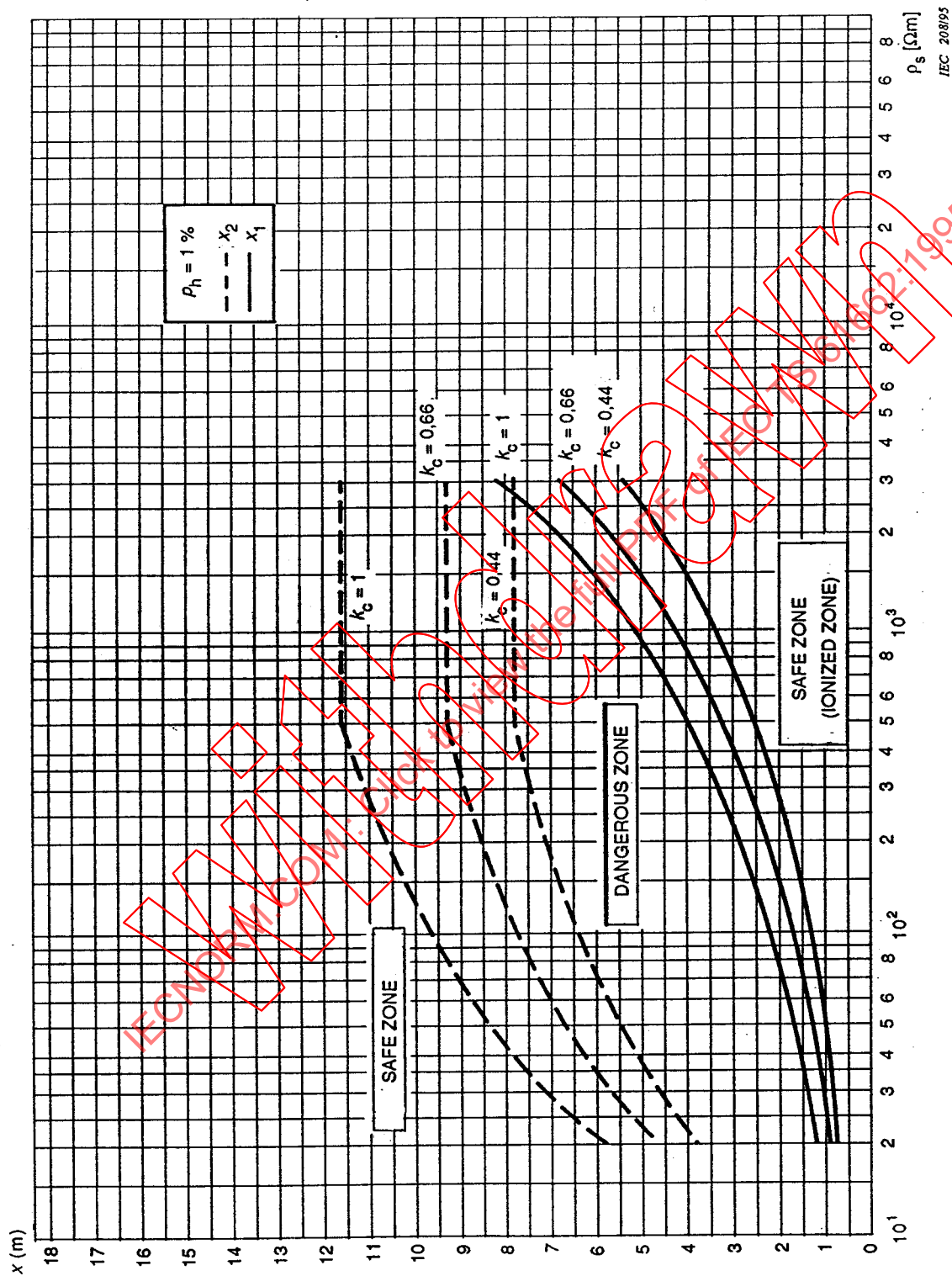


Figure A.4 – Type A earthing arrangements. Limits x_1 and x_2 of dangerous zone for step voltage, for various values of K_c and for a given probability of $p_h = 1\%$

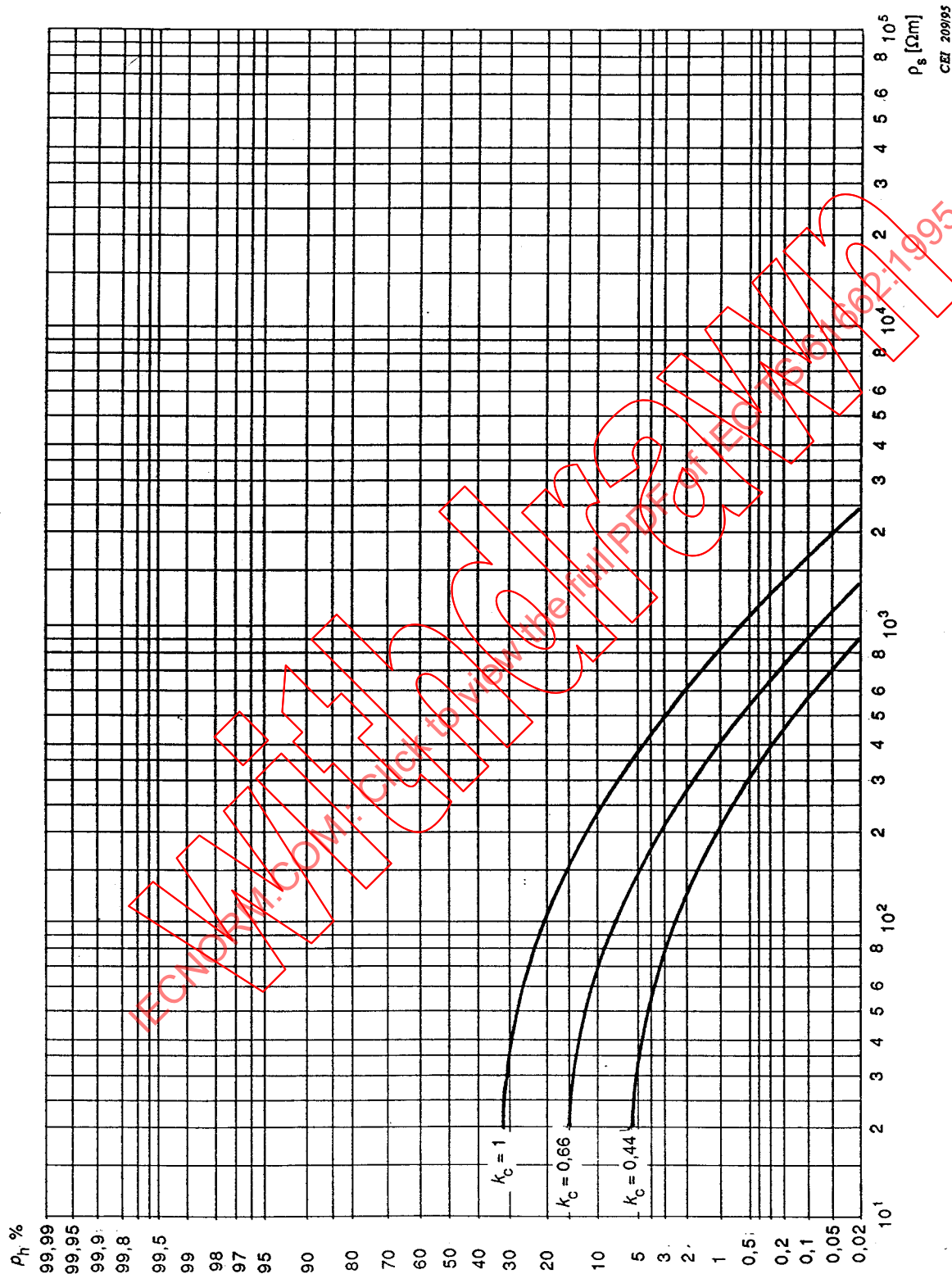


Figure A.5 – Installations de mise à la terre de type A. Probabilité de choc dû à la tension de contact en fonction de la résistivité de surface du sol ρ_s pour diverses valeurs de K_c

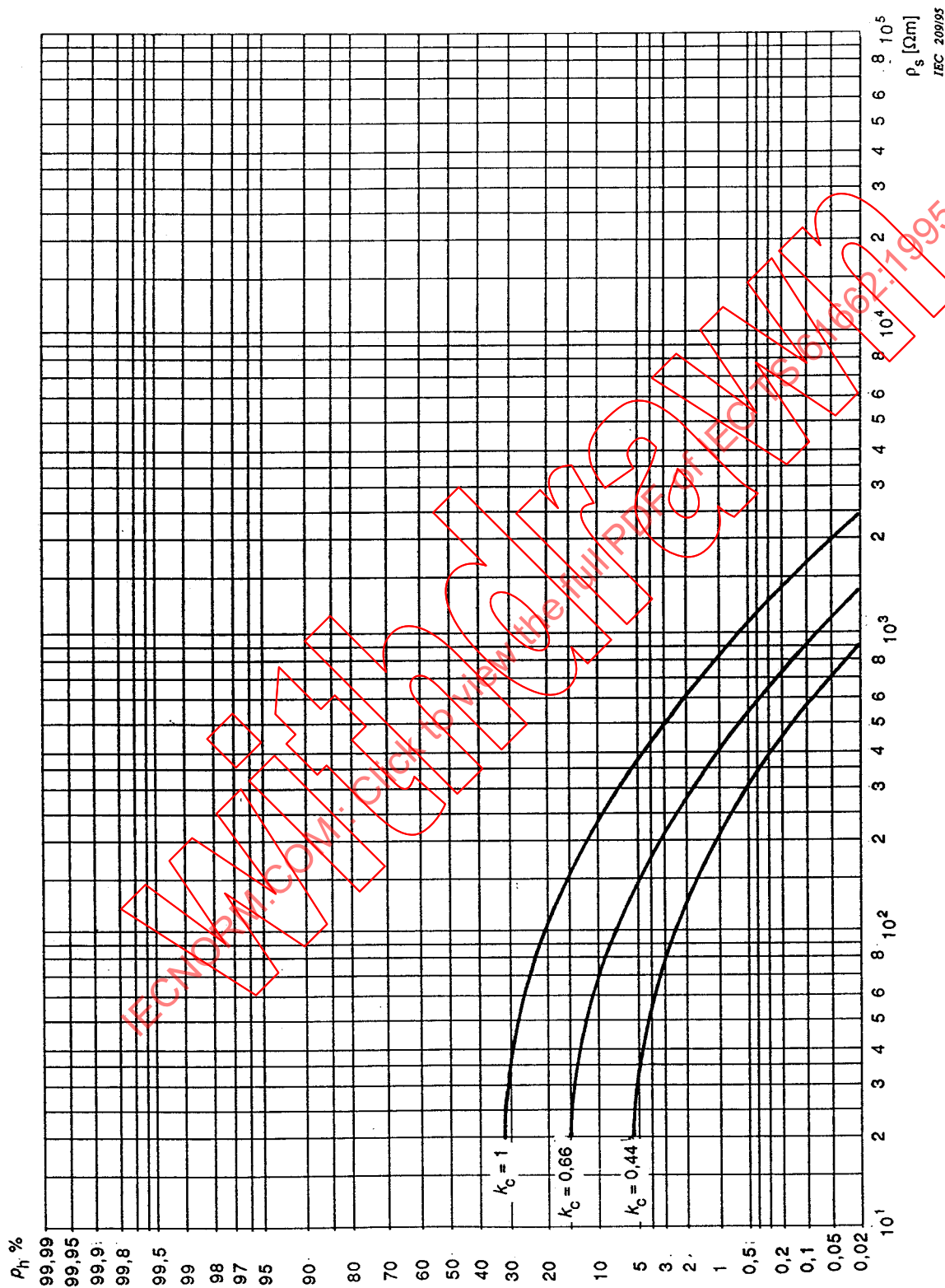


Figure A.5 – Type A earthing arrangements. Probability of shock due to touch voltage as a function of surface soil resistivity ρ_s for various values of K_c

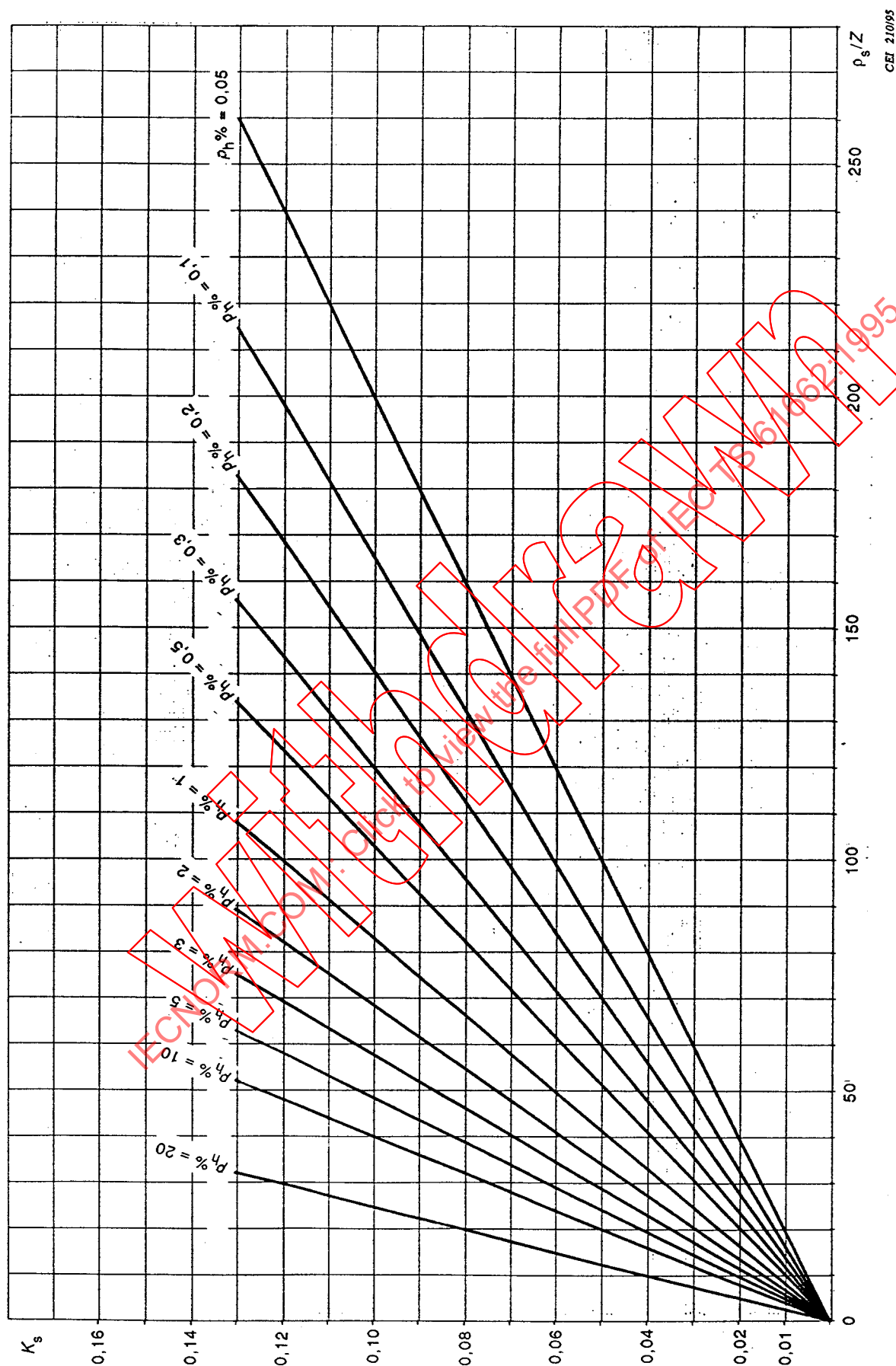


Figure A.6 – Installations de mise à la terre de type B. Probabilité de choc dû à la tension de pas en fonction de K_s et de p_s/Z

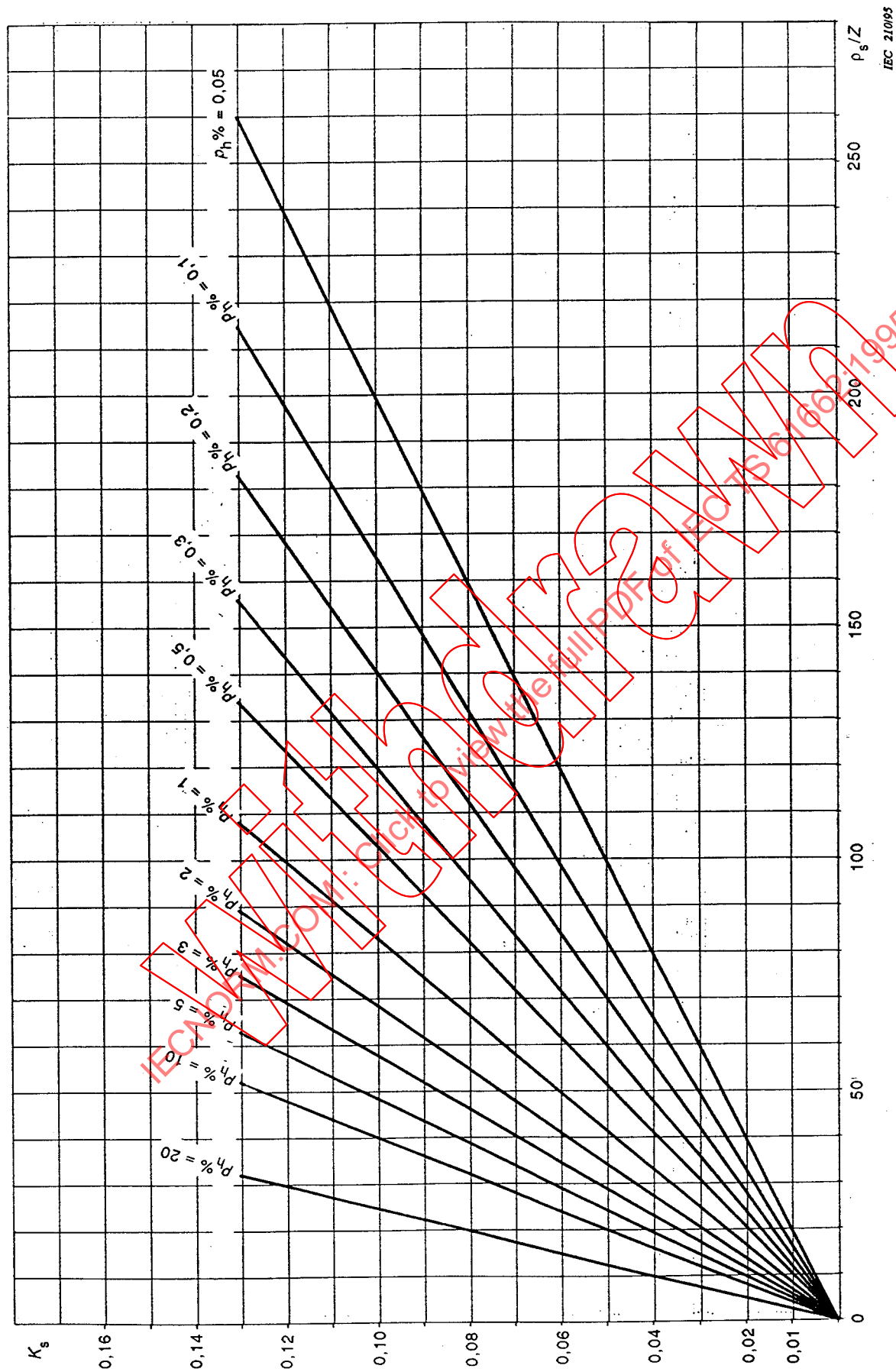


Figure A.6 – Type B earthing arrangements. Probability of shock due to step voltage as a function of K_s and ρ_s/Z

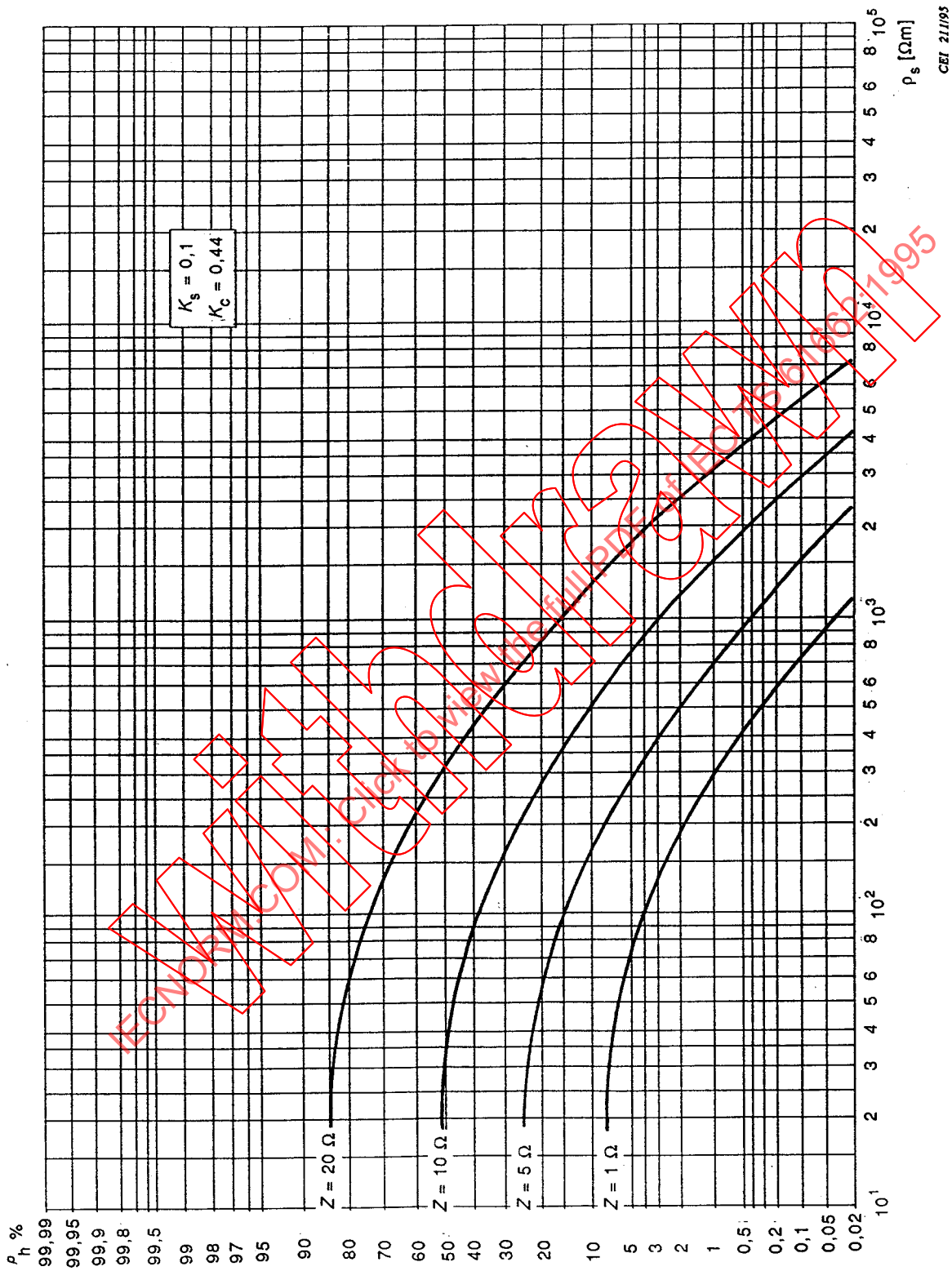


Figure A.7 – Installations de mise à la terre de type B. Probabilité de choc dū à la tension de contact en fonction de la résistivité de surface du sol ρ_s pour diverses valeurs de la résistance équivalente de terre Z

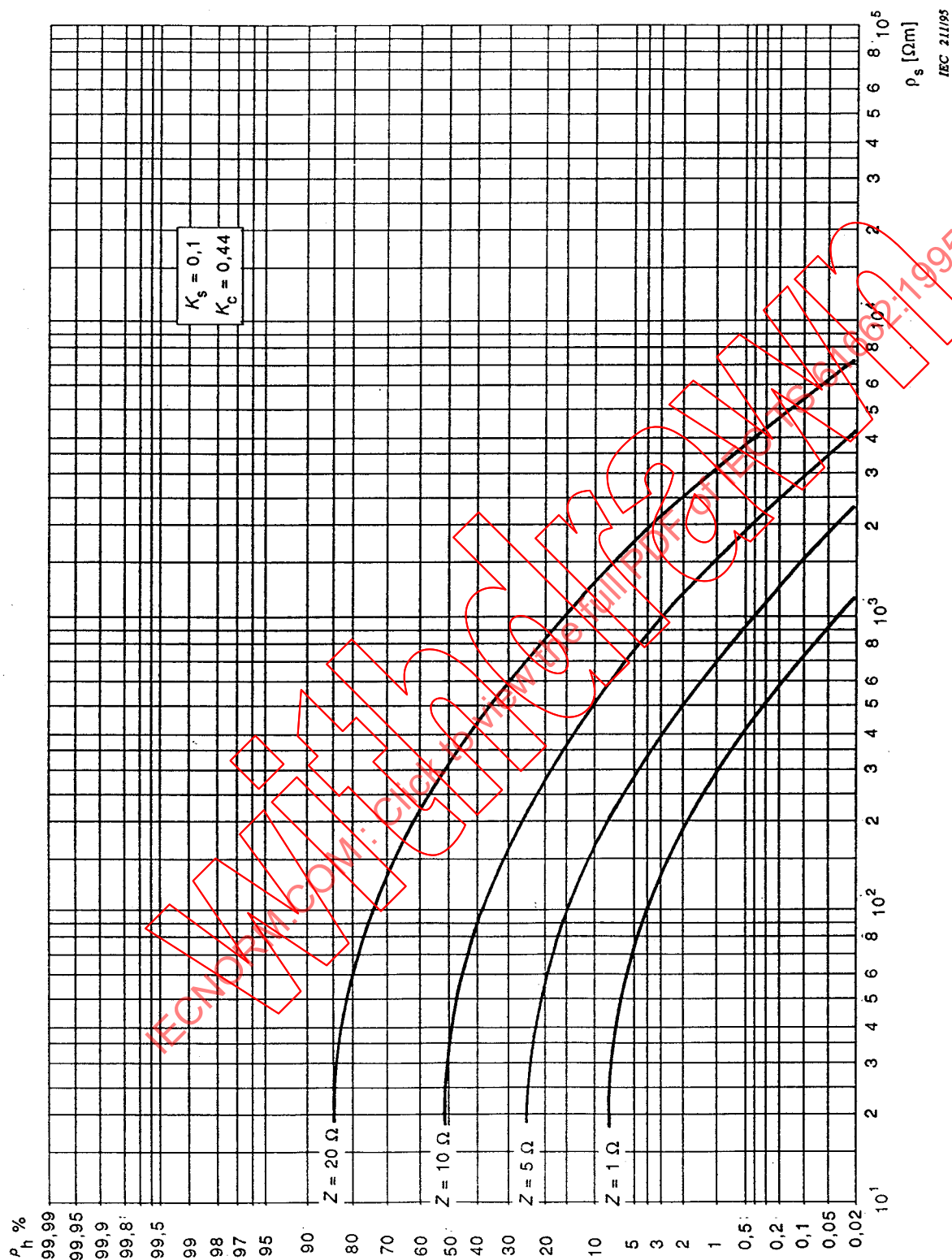


Figure A.7 – Type B earthing arrangements. Probability of shock due to touch voltage as a function of surface soil resistivity ρ_s for various values of equivalent earth resistance Z

Annexe B (informative)

Exemples d'évaluation des risques de dommages dus à la foudre

Objet

L'objet de la présente annexe est de donner des exemples sur la manière d'évaluer le risque de dommages dus à la foudre par les méthodes présentées dans le présent rapport technique. Deux exemples sont donnés dans la présente annexe afin de montrer comment l'évaluation des risques peut être appliquée à une société commerciale isolée située en région plate et à un musée également situé en région plate.

Exemple 1 – Société commerciale

La société commerciale occupe un bâtiment de 18 m de hauteur, couvrant une zone de 100 m de longueur par 60 m de largeur.

Dans le bâtiment, $n = 200$ personnes sont normalement présentes pendant une durée d'environ 1 600 heures par an (par personne).

Le bâtiment est construit en béton armé d'acier, situé dans une région plate, assez loin de toute autre structure de hauteur comparable.

La densité de coups de foudre au sol de la région est $N_g = 1$ coup de foudre par km^2 par an et la résistivité du sol est $\rho = 100 \, \Omega\text{m}$.

La surface du sol à l'extérieur de la structure est en «marbre».

Des matériaux «communs» entrent dans le contenu de la structure, et les mesures de protection contre l'incendie ne sont que des «équipements individuels de lutte contre l'incendie».

Les câbles à l'intérieur de la structure ne sont pas blindés.

Le réseau de distribution électrique entrant est un câble basse tension (BT) enterré.

Toutes les lignes de télécommunications informatiques utilisent des câbles à fibre optique.

La ligne téléphonique entrante est un câble enterré.

Afin de déterminer s'il convient de mettre en oeuvre des mesures de protection, et lesquelles, le risque de dommages est calculé comme suit.

Types et sources de dommages

Les dommages suivants peuvent se produire et doivent être pris en compte:

- 1 dommages corporels ou perte de vie humaine;
- 4 pertes de biens sans valeur culturelle ou sociale.

Annex B

(informative)

Examples of the assessment of risk of damage due to lightning

Object

The purpose of this annex is to provide examples of how to conduct an assessment of the risk of damage due to lightning using the methods given in this technical report. Two examples are provided in this annex to show how the risk assessment can be applied for an isolated commercial company located in flat country and for a museum also located in a flat area.

Example 1 – Commercial company

The commercial company building is 18 m high, covering an area of 100 m in length by 60 m in width.

In the building, $n = 200$ people are normally present for a time of approximately 1 600 hours per year (per person).

The building is constructed of steel reinforced concrete, located in flat country, and largely isolated from other structures of similar height.

The ground flash density of the territory is $N_g = 1$ flash per km^2 per year and the resistivity of the soil is $\rho = 100 \, \Omega\text{m}$.

A "marble" surface layer of soil is outside the building.

"Common" materials are involved as the content of the structure and the protective measures against fire are only some "small fire fighting equipment".

Only unscreened cables are present inside the structure.

The incoming mains supply is a low voltage (LV) underground cable.

All computer communication lines use fibre optic cables.

The incoming telephone line is an underground cable.

To determine whether to protect and the protective measures to be provided, the risk of damage is calculated as follows.

Types and sources of damages

The following damages can occur and should be considered:

- 1 injury or loss of human life;
- 4 losses of goods not involving cultural and social values.

Les sources des dommages sont:

- S_1 tensions de contact ou de pas dues aux coups de foudre directs;
- S_2 incendie ou explosion, dus aux coups de foudre directs;
- S_3 surtensions sur matériels, dues aux coups de foudre directs;
- S_4 surtensions sur matériels, dues aux coups de foudre indirects;
- S_5 incendie ou explosion dus aux surtensions causées par des coups de foudre indirects.

Le nombre d'impacts de foudre directs sur la structure, calculé par la formule (3) et la méthode donnée en 2.2.1 est:

$$N_d = N_g A_e = 6\,000 + 2 \times (60 + 100) \times 3 \times 18 + \pi \times 3^2 \times 18^2 \approx 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ coup de foudre par an}$$

Le nombre d'impacts de foudre au sol avoisinant la structure, calculé par la formule (5) et la méthode donnée en 2.2.2.1, est:

$$N_n = N_g A_g = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ coup de foudre par an}$$

avec

$$A_g = 6\,000 + 2 \times (100 \times 100) + 2 \times (100 \times 60) + \pi 100^2 - A_e \approx 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ km}^2$$

Le nombre de coups de foudre sur chaque service entrant (N_k) peut être calculé avec les formules (6) et (7) et les tableaux 1 et 2.

La surface d'influence (A_1) du câble d'énergie BT enterré est:

$$A_1 = 2 d_s (L - d_s) 10^{-6} = 2 \times 100 \times (1\,000 - 100) \times 10^{-6} = 0,18 \text{ km}^2$$

et en conséquence

$$N_1 = N_g A_1 = 0,18 \text{ coup de foudre par an}$$

La surface d'influence (A_2) du câble téléphonique enterré est:

$$A_2 = 2 \times 100 \times (1\,000 - 100) \times 10^{-6} = 0,18 \text{ km}^2$$

et en conséquence:

$$N_2 = N_g A_2 = 0,18 \text{ coup de foudre par an}$$

$$N_i = N_1 + N_2 = 0,36 \text{ coup de foudre par an}$$

Dommages 1 – Perte de vie humaine

Dans le cas de dommages de type 1, il convient de prendre en compte les sources S_1 , S_2 and S_5 .

La probabilité de dommages dus aux coups de foudre directs est calculée en prenant en compte les différentes sources de dommages concernées (S_1 et S_2):

$$P_d = P_h + P_{fd}$$

The sources of such damages are:

- S_1 touch or step voltages by direct lightning flashes;
- S_2 fire or explosion by direct lightning flashes;
- S_3 overvoltages on equipment by direct lightning flashes;
- S_4 overvoltages on equipment by indirect lightning flashes;
- S_5 fire or explosion due to overvoltages by indirect lightning flashes.

The *number of direct flashes* to the structure, calculated by formula (3) and the method given in 2.2.1 is:

$$N_d = N_g A_e = 6\,000 + 2 \times (60 + 100) \times 3 \times 18 + \pi \times 3^2 \times 18^2 \approx 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ flashes per year}$$

The *number of flashes striking to ground nearby the structure* evaluated by formula (5) and the method given in 2.2.2.1 is:

$$N_n = N_g A_g = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ flashes per year}$$

with

$$A_g = 6\,000 + 2 \times (100 \times 100) + 2 \times (100 \times 60) + \pi 100^2 - A_e \approx 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ km}^2$$

The *number of lightning flashes affecting each incoming service* (N_k) may be evaluated by the formulas (6) and (7) and tables 1 and 2.

The area of influence (A_1) of the LV underground power cable is:

$$A_1 = 2 d_s (L - d_s) 10^{-6} = 2 \times 100 \times (1\,000 - 100) \times 10^{-6} = 0,18 \text{ km}^2$$

and then

$$N_1 = N_g A_1 = 0,18 \text{ flashes per year}$$

The area of influence (A_2) of the LV underground telephone line is:

$$A_2 = 2 \times 100 \times (1\,000 - 100) \times 10^{-6} = 0,18 \text{ km}^2$$

and then

$$N_2 = N_g A_2 = 0,18 \text{ flashes per year}$$

$$N_i = N_1 + N_2 = 0,36 \text{ flashes per year}$$

Damage 1 – Loss of human life

In the case of damage of type 1, the sources S_1 , S_2 and S_5 should be considered.

The *probability of damage due to direct flashes* is calculated taking into account the different sources of damages involved (S_1 and S_2):

$$P_d = P_h + P_{fd}$$