



**Avant-projet de norme soumis à enquête probatoire jusqu'au :  
10 décembre 2009**

prNF EN 62305-1

indice de classement : C 17-100-1

**T1**

**T2 Protection contre la foudre**

**T3 Partie 1 : principes généraux**

E : Protection against lightning - Part 1 : general principles

D :

Avant-projet de norme française homologuée

Est destiné à remplacer la norme homologuée NF EN 62305-1, de juin 2006.

---

Correspondance

---

Analyse

---

Modifications

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Domaine d'application .....	8
2 Références normatives .....	8
3 Termes et définitions .....	8
4 Paramètres du courant de foudre .....	14
5 Dommages dus à la foudre .....	14
5.1 Dommages sur la structure .....	14
5.2 Types de pertes.....	17
6 Nécessité et besoin économique d'une protection contre la foudre.....	18
6.1 Nécessité d'une protection contre la foudre.....	18
6.2 Besoin économique d'une protection contre la foudre .....	19
7 Mesures de protection .....	19
7.1 Mesures de protection pour réduire les blessures des personnes dues aux chocs électriques.....	19
7.2 Mesures de protection pour réduire les dommages physiques.....	19
7.3 Mesures de protection pour réduire les défaillances des réseaux de puissance et de communication .....	20
7.4 Choix des mesures de protection .....	20
8 Critère de base pour la protection des structures.....	20
8.1 Niveaux de protection contre la foudre (NPF) .....	21
8.2 Zones de protection contre la foudre (ZPF) .....	23
8.3 Protection des structures .....	25
Annexe A (informative) Paramètres du courant de foudre .....	28
Annexe B (informative) Fonctions temporelles du courant de foudre à des fins d'analyse.....	38
Annexe C (informative) Simulation du courant de foudre aux fins d'essais.....	43
Annexe D (informative) Paramètres d'essai simulant les effets de la foudre sur les composants des systèmes de protection contre la foudre (SPF).....	47
Annexe E (informative) Chocs dus à la foudre en divers points de l'installation .....	61
<b>Bibliographie .....</b>	<b>66</b>
Figure 1 – Liaison entre les parties de la présente norme .....	7
Figure 2 – Types de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages.....	18
Figure 3 – Zones de protection contre la foudre (ZPF) définies par un SPF (CEI 62305- 3) .....	24
Figure 4 – ZPF définies par les mesures de protection contre l'IEMF (CEI 62305-4) .....	25
Figure A.1 – Définitions des paramètres d'un choc court (typiquement $T_2 < 2$ ms ).....	28
Figure A.2 – Définitions des paramètres d'un choc long (typiquement $2$ ms $< T_{long} < 1$ s) .....	29

Figure A.3 – Composantes possibles d'éclairs descendants (typiques en environnement plat et sur des structures peu élevées).....	29
Figure A.4 – Composantes possibles d'éclairs ascendants (typiques sur des structures exposées et/ou élevées) .....	30
Figure A.5 – Fréquence de distribution cumulative des paramètres du courant de foudre (valeurs de 95 % à 5 %) .....	34
Figure B.1 – Forme d'onde du courant de montée du coup positif .....	39
Figure B.2 – Forme d'onde du courant de queue du coup positif .....	39
Figure B.3 – Forme d'onde du courant de montée du premier coup négatif.....	40
Figure B.4 – Forme d'onde du courant de queue du premier coup négatif .....	40
Figure B.5 – Forme d'onde du courant de montée des coups consécutifs négatifs .....	41
Figure B.6 – Forme d'onde du courant de queue des coups consécutifs négatifs.....	41
Figure B.7 – Densité du courant de foudre pour le niveau de protection I .....	42
Figure C.1 – Exemple de générateur d'essai pour la simulation de l'énergie spécifique du premier coup de foudre de courte durée positif et pour la charge du coup de foudre de longue durée.....	44
Figure C.2 – Définition de la raideur du courant conformément au Tableau C.3 .....	45
Figure C.3 – Exemple de générateur d'essai pour la simulation de la raideur du front du premier coup de foudre court positif pour des appareils d'essai importants.....	46
Figure C.4 – Exemple de générateur d'essai pour la simulation de la raideur du front des coups de foudre consécutifs courts négatifs pour des matériels importants.....	46
Figure D.1 – Disposition générale de deux conducteurs pour le calcul des forces électrodynamiques.....	53
Figure D.2 – Disposition typique des conducteurs dans un SPF .....	53
Figure D.3 – Diagramme des contraintes pour la configuration de la Figure D.2 .....	54
Figure D.4 – Force par unité de longueur le long du conducteur horizontal de la Figure D.2 .....	54
Tableau 1 – Effets de la foudre sur des structures habituelles.....	15
Tableau 2 – Dommages et pertes dans une structure selon les différents points d'impact de la foudre .....	17
Tableau 3 – Valeurs maximales des paramètres de foudre correspondant aux niveaux de protection contre la foudre.....	21
Tableau 4 – Valeurs minimales des paramètres de foudre et rayon de sphère fictive associé correspondant aux niveaux de protection contre la foudre .....	22
Tableau 5 – Probabilités des limites des paramètres du courant de foudre .....	22
Tableau A.1 – Valeurs des paramètres du courant de foudre de la CIGRE (Electra N° 41 ou N° 69*) [3], [4] .....	31
Tableau A.2 – Distribution logarithmique normale des paramètres de courant de foudre – Valeurs moyennes $\mu$ et de dispersion $\sigma_{\log}$ calculées pour 95 % et 5 % à partir de CIGRE (Electra N° 41 ou N° 69) [3], [4] .....	32
Tableau A.3 – Valeurs de la probabilité $P$ en fonction du courant de foudre $I$ .....	33
Tableau B.1 – Paramètres pour l'équation B.1 .....	38
Tableau C.1 – Paramètres d'essai du premier coup de foudre de courte durée positif.....	44
Tableau C.2 – Paramètres d'essai d'un coup de foudre de longue durée .....	44
Tableau C.3 – Paramètres d'essai de coups de foudre de courte durée.....	45
Tableau D.1 – Synthèse des paramètres de foudre à considérer pour le calcul des valeurs d'essai pour divers composants des SPF et pour divers niveaux de protection .....	47

Tableau D.2 – Caractéristiques physiques de matériaux typiques utilisés dans les composants des SPF .....	50
Tableau D.3 – Elévation de température de conducteurs de diverses sections en fonction de $W/R$ .....	51
Tableau E.1 – Valeurs de résistance conventionnelle de terre $Z$ et $Z_1$ suivant la résistivité du sol.....	62
Tableau E.2a – Surintensités de foudre prévues dues aux impacts de foudre sur des réseaux basse tension .....	63
Tableau E.2b – Surintensités de foudre prévues dues aux impacts de foudre sur des réseaux de communication.....	64

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### PROTECTION CONTRE LA FOUDRE –

#### Partie 1: Principes généraux

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62305-1 a été établie par le comité d'études 81 de la CEI: Protection contre la foudre.

Le texte de cette deuxième édition de la CEI 62305-1 est élaboré à partir de la première édition (2006) et la remplace.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants :

FDIS	Rapport de vote
81/xxx/FDIS	81/xxx/RVD

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

Cette publication a été rédigée, aussi fidèlement que possible, selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La CEI 62305 comprend les parties suivantes, regroupées sous le titre général *Protection contre la foudre*:

Partie 1 : Principes généraux

Partie 2 : Evaluation des risques

Partie 3 : Dommages physiques sur les structures et risques humains

Partie 4 : Réseaux de puissance et de communication dans les structures

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

## INTRODUCTION

Il n'existe pas de dispositifs ou de méthodes susceptibles de modifier les phénomènes naturels au point d'empêcher les décharges de foudre. Les impacts de foudre sur des structures ou à leur proximité (ou sur des services pénétrant dans les structures) sont dangereux pour les personnes, les structures elles-mêmes, leur contenu, les installations et les services. C'est pourquoi les mesures de protection contre la foudre sont essentielles.

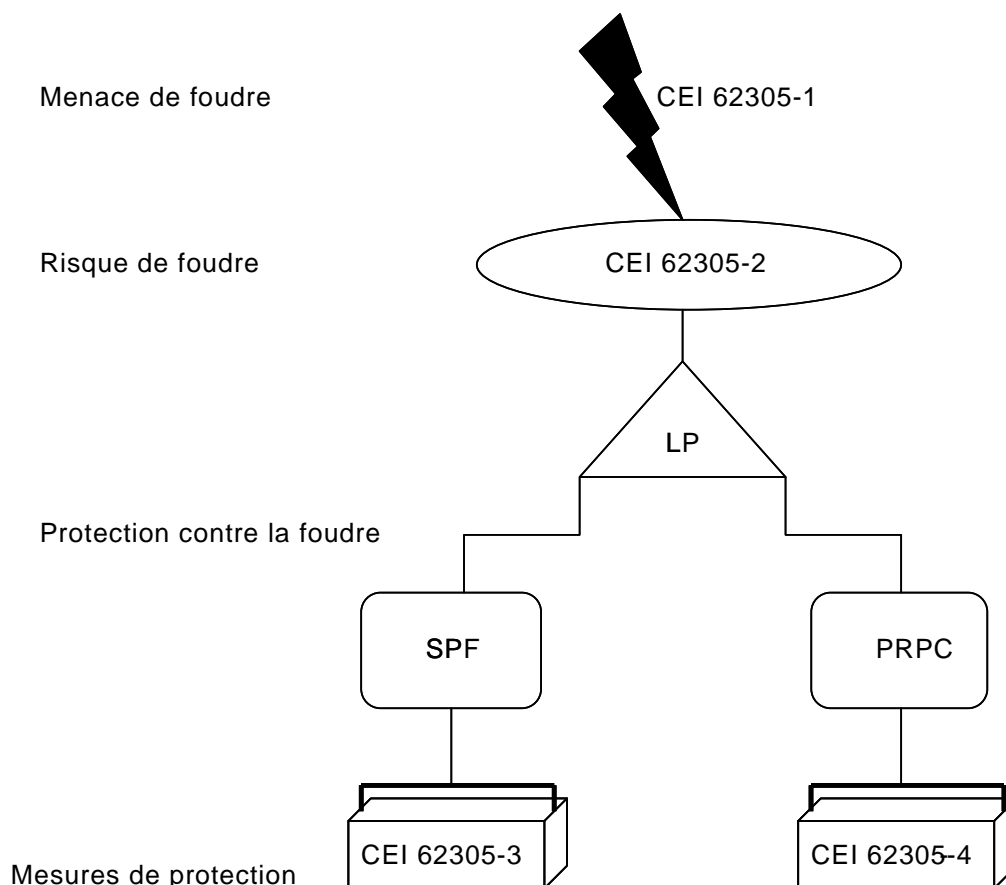
Il convient que le besoin d'une protection, les bénéfices économiques de la mise en œuvre de mesures de protection appropriées et leur choix soient déterminés en termes d'évaluation des risques. La méthode d'évaluation des risques fait l'objet de la CEI 62305-2.

Dans la présente norme, la réduction des risques constitue l'une des mesures de protection la plus efficace.

Toutes les mesures de protection contre la foudre constituent la protection générale contre la foudre. Pour des raisons pratiques, les critères de conception, de mise en œuvre et de maintenance de mesures de protection contre la foudre sont analysés dans deux groupes séparés:

- le premier groupe qui se réfère aux mesures de protection de réduction des dommages physiques et des dangers pour les personnes dans une structure fait l'objet de la CEI 62305-3,
- le deuxième groupe qui se réfère aux mesures de protection de réduction des défaillances des réseaux de puissance et de communication dans une structure fait l'objet de la CEI 62305-4,

La Figure 1 illustre la liaison entre les parties de la présente norme.



**Figure 1 – Liaison entre les parties de la présente norme**

## PROTECTION CONTRE LA FOUDRE –

### Partie 1: Principes généraux

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62305 donne des principes généraux à suivre pour la protection contre la foudre des structures, y compris leurs installations, leur contenu et les personnes.

Les cas suivants sont hors du domaine d'application de la présente norme :

- chemins de fer ;
- véhicules, navires, avions, installations en mer ;
- canalisations enterrées à haute pression ;
- canalisations, lignes de puissance et de communication non reliées à la structure.

NOTE Ces cas sont généralement régis par des règlements particuliers émis par des autorités compétentes.

#### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 62305-2, *Protection contre la foudre – Partie 2: Evaluation des risques*

CEI 62305-3, *Protection contre la foudre – Partie 3: Dommages physiques sur les structures et risques humains*

CEI 62305-4, *Protection contre la foudre – Partie 4: Réseaux de puissance et de communication dans les structures*

#### 3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente Norme, les termes et définitions suivants s'appliquent.

##### 3.1

##### **coup de foudre à la terre**

décharge électrique d'origine atmosphérique entre un nuage et la terre, consistant en un ou plusieurs coups de foudre

##### 3.2

##### **éclair descendant**

éclair initié par un précurseur descendant du nuage vers le sol

NOTE Un éclair descendant comprend un premier coup de foudre de courte durée, pouvant être suivi de coups consécutifs de courte durée, et pouvant inclure un coup de longue durée.

##### 3.3

##### **éclair ascendant**

éclair initié par un précurseur ascendant depuis une structure sur le sol vers un nuage



NOTE Un éclair ascendant comprend un premier coup de foudre de longue durée avec ou sans multiples coups de courte durée superposés. Un ou plusieurs coups de courte durée peuvent être suivis d'un coup de longue durée.

### 3.4

#### **coup de foudre**

simple décharge électrique lors d'un coup de foudre à la terre

### 3.5

#### **coup de foudre de courte durée**

partie du coup de foudre correspondant à un courant impulsionnel

NOTE Ce courant présente un temps jusqu'à mi-valeur  $T_z$  de valeur spécifique inférieure à 2 ms (voir Figure A.1).

### 3.6

#### **coup de foudre de longue durée**

partie du coup de foudre correspondant à un courant permanent

NOTE La durée  $T_{\text{long}}$  (durée entre la valeur de 10 % du front et la valeur de 10 % de la queue) de ce courant permanent est typiquement supérieure à 2 ms et inférieure à 1 s (voir Figure A.2).

### 3.7

#### **coups multiples**

coup de foudre dont le nombre moyen de décharges est de 3 à 4, avec un intervalle de temps typique entre les décharges de 50 ms

NOTE Phénomènes pouvant avoir plus de quelques dizaines de décharges et pour lesquelles des intervalles de temps, entre les décharges, de 10 ms à 250 ms, ont été observés.

### 3.8

#### **point d'impact**

point où un coup de foudre frappe la terre, ou un objet important (par exemple une structure, une installation de protection contre la foudre, des services, un arbre, etc.)

NOTE Un coup de foudre peut avoir plus d'un point d'impact.

### 3.9

#### **courant de foudre**

$i$

courant s'écoulant au point d'impact

### 3.10

#### **valeur crête**

$I$

valeur maximale du courant de foudre

### 3.11

#### **raideur moyenne de montée du courant de foudre de courte durée**

valeur moyenne de la variation de courant dans un intervalle de temps  $\Delta t = t_2 - t_1$

NOTE Elle s'exprime comme la différence  $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$  entre les valeurs du courant au début et à la fin de cet intervalle de temps, divisée par l'intervalle de temps  $\Delta t = t_2 - t_1$  (voir Figure A.1).

### 3.12

#### **temps de montée du courant de foudre de courte durée**

$T_1$

paramètre virtuel défini égal à 1,25 fois l'intervalle entre les instants où 10 % et 90 % de la valeur crête sont atteints (voir Figure A.1)

**3.13****origine virtuelle du courant de foudre de courte durée** $O_1$ 

point d'intersection avec l'axe du temps d'une ligne droite tracée entre les points de référence du temps de montée 10 % et 90 % (voir Figure A.1) ; elle est précédée par l'instant  $0,1 T_1$  correspondant à 10 % de sa valeur crête

**3.14****temps jusqu'à mi-valeur** $T_2$ 

paramètre virtuel défini égal à l'intervalle de temps entre l'origine virtuelle  $O_1$  et l'instant où le courant a décru jusqu'à mi-valeur du courant crête (voir Figure A.1)

**3.15****durée de l'éclair** $T$ 

durée pendant laquelle le courant de foudre s'écoule au point d'impact

**3.16****durée d'un courant de choc de longue durée** $T_{\text{long}}$ 

temps durant lequel l'amplitude du courant de foudre de longue durée est comprise entre 10 % de la valeur crête lors de l'accroissement du courant permanent et 10 % de la valeur crête lors de la diminution du courant permanent (voir Figure A.2)

**3.17****charge impulsionnelle** $Q_{\text{flash}}$ 

intégrale de temps du courant de foudre pendant la durée totale du coup de foudre

**3.18****charge de coup de foudre de courte durée** $Q_{\text{short}}$ 

intégrale de temps du courant de foudre pendant la durée du coup de foudre de courte durée

**3.19****charge de coup de foudre de longue durée** $Q_{\text{long}}$ 

intégrale de temps du courant de foudre pendant la durée du coup de foudre de longue durée

**3.20****énergie spécifique** $W/R$ 

intégrale de temps du carré du courant de foudre pendant la durée totale du coup de foudre

NOTE Elle représente l'énergie dissipée par le courant de foudre dans une résistance unité.

**3.21****énergie spécifique du courant de courte durée**

intégrale de temps du carré du courant de foudre pendant la durée du coup de foudre de courte durée

NOTE L'énergie spécifique d'un courant de longue durée est négligeable.

**3.22****structure à protéger**

structure pour laquelle une protection contre les effets de la foudre est prescrite conformément à la présente norme

NOTE Une structure à protéger peut être une partie d'une structure plus grande.

**3.23****service**

service de puissance ou de communication relié à la structure à protéger

**3.24****services de communication**

services destinés à la communication entre des matériels pouvant être situés dans des structures séparées, tels que ligne téléphonique et ligne de transmission de données

**3.25****services de puissance**

lignes de distribution alimentant en énergie électrique un matériel de puissance et de communication situé dans une structure, tel que réseau électrique basse tension (BT) ou haute tension (HT)

**3.26****coup de foudre direct sur une structure**

coup de foudre frappant directement la structure à protéger

**3.27****coup de foudre proche d'une structure**

impact du coup de foudre suffisamment proche de la structure à protéger et pouvant engendrer des surtensions dangereuses

**3.28****réseau de puissance**

réseau comprenant des composants de l'alimentation de puissance basse tension

**3.29****réseau de communication**

réseau comprenant des composants électroniques sensibles tels que matériels de communication, systèmes d'ordinateurs, de commande et d'instrumentation, systèmes radio et installations d'électronique de puissance

**3.30****réseau interne**

réseaux de puissance et de communication à l'intérieur d'une structure

**3.31****dommage physique**

dommage sur la structure (ou dans son contenu) ou sur un service en raison d'effets mécaniques, thermiques, chimiques et explosifs de la foudre

**3.32****blessures d'êtres vivants**

blessures, y compris la mort, de personnes ou d'animaux par choc électrique en raison des tensions de contact et de pas dues à la foudre

NOTE Bien que les blessures d'êtres vivants puissent avoir d'autres origines, l'expression "blessures d'êtres vivants" spécifiée dans la présente norme se limite à la menace due au choc électrique (type de dommage D1).

**3.33****défaillance d'un réseau de puissance et de communication**

dommage permanent d'un réseau de puissance et de communication dû aux effets électromagnétiques de la foudre (IEMF)

**3.34****impulsion électromagnétique de foudre**

IEMF

tous les effets électromagnétiques dus au courant de foudre par couplage résistif, inductif et capacitif qui crée des chocs de tension et des champs électromagnétiques rayonnés

**3.35****choc**

onde transitoire créant une surtension et/ou une surintensité due à l'IEMF

**3.36****zone de protection contre la foudre**

ZPF

zone où l'environnement électromagnétique est défini

NOTE Les limites d'une ZPF ne sont pas forcément des limites physiques (par exemple les parois, le sol ou le plafond).

**3.37****risque** $R$ 

valeur moyenne des pertes probables annuelles (personnes et biens) en raison de la foudre par rapport à la valeur totale (personnes et biens) de la structure à protéger

**3.38****risque tolérable** $R_T$ 

valeur maximale du risque pouvant être tolérée par la structure à protéger

**3.39****niveau de protection contre la foudre**

NPF

chiffre lié à l'ensemble de paramètres du courant de foudre et relatif à la probabilité que les valeurs minimales et maximales prévues ne seront pas dépassées lors d'apparition naturelle d'orages

NOTE Un niveau de protection contre la foudre est utilisé pour prévoir des mesures de protection conformément à l'ensemble des paramètres du courant de foudre.

**3.40****mesures de protection**

mesures à adopter pour la structure à protéger afin de réduire le risque

**3.41a****protection contre la foudre**

PF

installation complète de protection des structures et/ou des réseaux de puissance et de communication situés dans ces structures contre les effets de la foudre, comprenant généralement un SPF et une PRPC

**3.41****système de protection contre la foudre**

SPF

installation complète utilisée pour réduire les dangers de dommages physiques dus aux coups de foudre directs sur une structure

NOTE Elle comprend à la fois une installation extérieure et une installation intérieure de protection contre la foudre.

**3.42****installation extérieure du système de protection contre la foudre**

partie du système de protection contre la foudre (SPF) comprenant un dispositif de capture, des conducteurs de descente et une prise de terre

**3.43****installation intérieure du système de protection contre la foudre**

partie du système de protection contre la foudre (SPF) comprenant les liaisons équipotentielles de foudre et/ou l'isolation électrique d'un SPF extérieur

**3.44****dispositif de capture**

partie de l'installation extérieure de SPF utilisant des éléments métalliques tels que tiges, mailles ou fils tendus destinés à intercepter la foudre

**3.45****conducteur de descente**

partie de l'installation extérieure de SPF destinée à conduire le courant de foudre du dispositif de capture à la prise de terre

**3.46****prise de terre**

partie de l'installation extérieure de SPF destinée à conduire et à dissiper le courant de foudre à la terre

**3.47****éléments conducteurs extérieurs**

parties métalliques pénétrant dans ou quittant la structure à protéger telles que canalisations, éléments de câbles métalliques, conduits métalliques, etc. pouvant écouler une partie du courant de foudre

**3.48****liaison équipotentielle de foudre**

interconnexion des parties métalliques d'une installation de SPF, par des connexions directes ou par des parafoudres réduisant les différences de potentiel engendrées par le courant de foudre

**3.49****résistance conventionnelle de terre**

rapport des valeurs crête de la tension et du courant de la borne de terre, qui, en général, ne se produisent pas en même temps

**3.50****protection de réseau de puissance et de communication**

PRPC

mesures prises pour protéger les réseaux internes contre les effets de l'IEMF

NOTE Il s'agit d'une partie de la protection générale contre la foudre.

**3.51****écran magnétique**

grillage métallique fermé ou écran continu entourant la structure à protéger, ou une partie de celle-ci, afin de réduire les défaillances des réseaux de puissance et de communication

**3.52****parafoudre**

dispositif conçu pour limiter les surtensions transitoires et évacuer les courants de choc. Il comporte au moins un composant non linéaire

**3.53****protection coordonnée par parafoudres**

(parafoudres coordonnés)

ensemble de parafoudres coordonnés choisis de manière appropriée et mis en œuvre afin de réduire les défaillances des réseaux de puissance et de communication

**3.54****tension assignée de choc** $U_w$ 

tension de choc donnée par le constructeur de l'équipement ou d'une partie de l'équipement, caractérisant la tenue spécifiée de son isolation contre les surtensions

NOTE Dans la présente norme, seule la tension assignée de choc entre les parties conductrices et la terre est considérée.

(CEI 60664-1:2002) [1]<sup>1</sup>

**3.55****interfaces d'isolement**

dispositifs capables de réduire les chocs conduits sur les services pénétrant dans la ZPF, comprenant des transformateurs d'isolement à écran mis à la terre entre les enroulements, les câbles à fibre optique non métalliques et les opto-isolateurs

NOTE Les caractéristiques de tenue d'isolement de ces dispositifs doivent être appropriées à la présente application.

**4 Paramètres du courant de foudre**

L'Annexe A donne les paramètres du courant de foudre utilisés dans la série CEI 62305.

L'Annexe B donne la fonction temporelle du courant de foudre à utiliser à des fins d'analyse.

L'Annexe C donne des informations pour la simulation du courant de foudre à des fins d'essais.

L'Annexe D donne les paramètres essentiels à utiliser dans les laboratoires pour simuler les effets de la foudre sur les composants des SPF.

L'Annexe E donne des informations sur les chocs dus à la foudre en divers points de l'installation.

**5 Dommages dus à la foudre****5.1 Dommages sur la structure**

La foudre qui frappe une structure peut entraîner des dommages sur cette structure, ses occupants et leurs biens, y compris des défaillances des réseaux internes. Les dommages et les défaillances peuvent aussi s'étendre dans l'environnement de la structure et peuvent impliquer l'environnement local. Cette extension est fonction des caractéristiques de la structure et du coup de foudre.

**5.1.1 Effets de la foudre sur la structure**

Les caractéristiques principales des structures vis-à-vis des effets de la foudre sont les suivantes :

---

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

- les matériaux de construction (par exemple, bois, brique, béton, béton armé, armatures métalliques) ;
- la fonction (habitat domestique, bureaux, fermes, théâtres, hôtels, écoles, hôpitaux, musées, églises, prisons, magasins, banques, usines, sites industriels, stades) ;
- les occupants et les biens (personnes et animaux, matériaux inflammables, matériaux non inflammables, mélanges explosifs ou non explosifs, réseaux de puissance et de communication à haute ou basse tension) ;
- les services connectés (réseaux de puissance, lignes de communication, canalisations) ;
- les mesures de protection existantes ou prévues (par exemple les mesures pour réduire des dommages physiques et pour protéger la vie, les mesures de protection pour limiter les défaillances des réseaux internes) ;
- l'échelle d'extension du danger (structure avec difficulté d'évacuation où la panique peut s'installer, structure avec danger pour les alentours, structure avec danger pour l'environnement).

Le Tableau 1 indique les effets de la foudre sur divers types de structures.

**Tableau 1 – Effets de la foudre sur des structures habituelles**

<b>Types de structures selon leur fonction et/ou leur contenu</b>	<b>Effets de la foudre</b>
Locaux d'habitation	Perforation des installations électriques, incendie et dommages matériels  Dommages normalement limités aux structures exposées au point d'impact ou aux cheminements du courant de foudre  Défaillances des matériels électriques et électroniques et des réseaux (par exemple téléviseurs, ordinateurs, modems, téléphones, etc.)
Fermes	Risque primaire d'incendie et saut de tension dangereux en plus des dommages matériels  Risque secondaire dû à la perte de l'alimentation et danger de mort pour le bétail en raison de la défaillance de la commande électronique de la ventilation et de la distribution de nourriture, etc.
Théâtres Hôtels Ecoles Magasins Stades	Dommages dans l'installation électrique (par exemple éclairage) susceptibles de provoquer la panique  Défaillance des alarmes incendie et retards des mesures anti-incendie
Banques Compagnies d'assurance Compagnies commerciales, etc.	Comme ci-dessus avec en complément des problèmes dus à la perte des communications, des défaillances des ordinateurs et la perte de données
Hôpitaux Nurseries Prisons	Comme ci-dessus avec en complément des problèmes de personnes en soins intensifs et des difficultés à évacuer des personnes impotentes
Industrie	Effets complémentaires en fonction des produits fabriqués, allant de la dégradation mineure aux dégâts inacceptables avec perte de production
Musées et sites archéologiques Eglises	Pertes irremplaçables de l'héritage culturel
Communications et production de puissance	Pertes inacceptables de services pour le public
Usines d'artifices Munitions	Conséquences d'incendie et d'explosion pour le site et son environnement

Usine chimique Raffinerie Site nucléaire Laboratoires biochimiques et sites	Incendie et dysfonctionnements sur le site avec des conséquences nuisibles pour l'environnement local et global
---	---

### 5.1.2 Sources et types de dommages pour une structure

Le courant de foudre est la source de dommage. Les sources de dommages suivantes doivent être prises en compte selon la situation du point d'impact sur la structure :

- S1 : éclair frappant directement la structure ;
- S2 : éclair frappant le sol à proximité de la structure ;
- S3 : éclair frappant directement les services connectés à la structure ;
- S4 : éclair frappant le sol à proximité des services connectés à la structure.

**Les éclairs frappant directement la structure** peuvent provoquer :

- des dommages mécaniques directs, un incendie et/ou une explosion dus au canal de foudre lui-même, dus au courant résultant de la chaleur ohmique des conducteurs ou à son courant associé (conducteurs surchauffés) et à sa charge (fusion du métal) ;
- un incendie et/ou une explosion dus à des étincelles en raison des surtensions de couplage résistif et inductif et à l'écoulement de courants de foudre partiels ;
- des blessures aux personnes par choc électrique dû aux tensions de contact et de pas en raison des couplages résistif et inductif ;
- des défaillances ou des dysfonctionnements des réseaux internes dus à l'IEMF.

**Les éclairs frappant le sol à proximité de la structure** peuvent provoquer :

- des défaillances ou des dysfonctionnements des réseaux internes dus à l'IEMF.

**Les éclairs frappant directement les services connectés à la structure** peuvent provoquer :

- un incendie et/ou une explosion dus à des étincelles en raison des surtensions et des courants de foudre transmis par les services connectés à la structure ;
- des blessures aux personnes par choc électrique dû aux tensions de contact dans la structure en raison des courants de foudre transmis par les services connectés à la structure ;
- des défaillances ou des dysfonctionnements des réseaux internes en raison des surtensions transmises par les services connectés à la structure.

**Les éclairs frappant le sol à proximité des services connectés à la structure** peuvent provoquer :

- des défaillances ou des dysfonctionnements des réseaux internes en raison des surtensions transmises par les services connectés à la structure.

NOTE 1 La protection contre les dysfonctionnements des réseaux internes est hors du domaine d'application de la série CEI 62305. Il convient de se référer à la CEI 61000-4-5 [2].

NOTE 2 Seules les étincelles du courant de foudre (partiel ou total) sont considérées comme pouvant être la cause d'un incendie.

NOTE 3 Les coups de foudre directs ou à proximité des canalisations entrantes ne provoquent pas de dommages sur la structure si les canalisations sont reliées à la liaison équipotentielle de la structure (voir la CEI 62305-3).

En conclusion, la foudre peut engendrer trois types essentiels de dommages :



- D1 : blessures d'êtres vivants dues aux chocs électriques ;
- D2 : dommages physiques (incendie, explosion, destruction mécanique, émanation chimique) dus au courant de foudre, y compris les étincelles dangereuses ;
- D3 : défaillances des réseaux internes dues à l'IMF.

## 5.2 Types de pertes

Chaque type de dommage, seul ou associé, peut entraîner des pertes différentes dans la structure à protéger. Le type de perte dépend des caractéristiques de la structure elle-même.

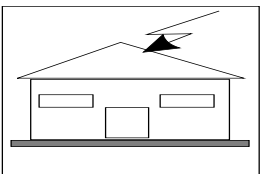
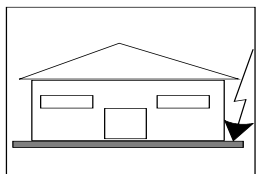
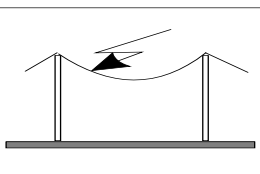
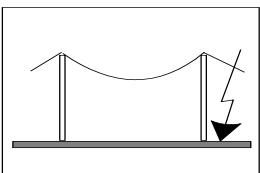
Pour les besoins de la présente norme, les types de pertes suivants sont considérés :

- L1 : perte de vie humaine (y compris blessure définitive) ;
- L2 : perte de service public ;
- L3 : perte d'héritage culturel ;
- L4 : perte économique (structure et son contenu, perte d'activité).

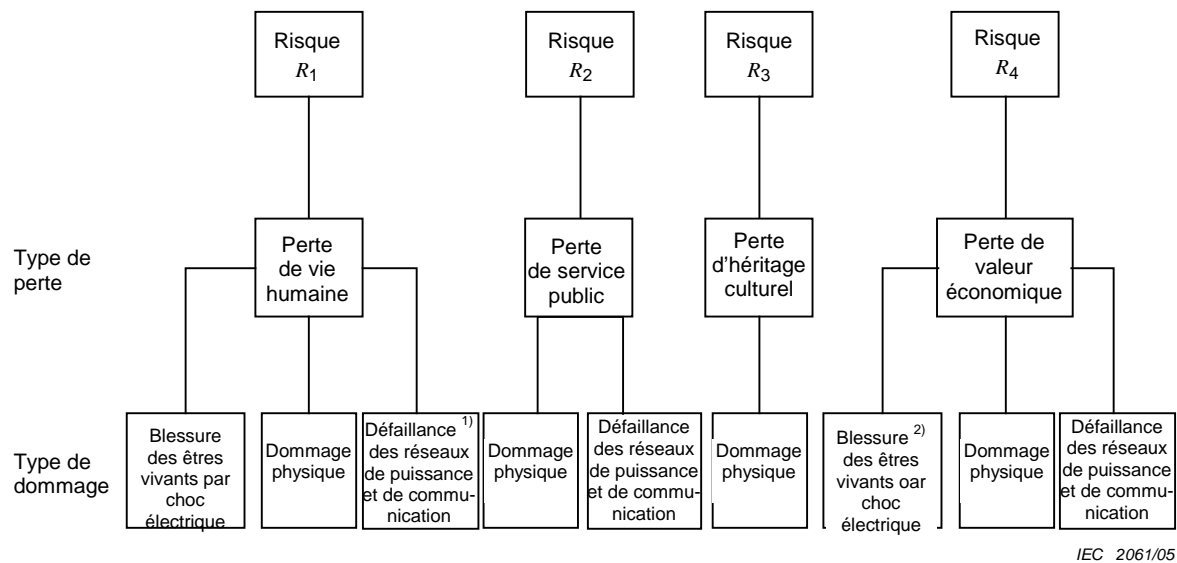
Les pertes L1, L2 et L3 peuvent être considérées comme des pertes sociales, tandis que L4 est considérée comme perte purement économique.

La correspondance entre les sources de dommages, les types de dommages et les pertes est indiquée dans le Tableau 3.

**Tableau 2 – Dommages et pertes dans une structure selon les différents points d'impact de la foudre**

Point d'impact		Source de dommage	Type de dommage	Type de perte
Structure		S1	D1 D2 D3	L1, L4** L1, L2, L3, L4 L1*, L2, L4
Proche de la structure		S2	D3	L1*, L2, L4
Service connecté à la structure		S3	D1 D2 D3	L1, L4** L1, L2, L3, L4 L1*, L2, L4
Proche d'un service		S4	D3	L1*, L2, L4
<p>* Seulement pour des structures avec risque d'explosion et pour les hôpitaux ou autres structures analogues dont la défaillance des réseaux internes met en danger immédiat la vie humaine.</p> <p>** Seulement dans le cas de perte d'animaux.</p>				

Les types de pertes en fonction des types de dommages et risques correspondants sont donnés à la Figure 2.



<sup>1)</sup> Seulement pour les hôpitaux et autres structures analogues où les défaillances des réseaux internes mettent en danger immédiat la vie humaine.

<sup>2)</sup> Seulement dans le cas de pertes d'animaux.

**Figure 2 – Types de pertes et risques correspondants dus à différents types de dommages**

## 6 Nécessité et besoin économique d'une protection contre la foudre

### 6.1 Nécessité d'une protection contre la foudre

La nécessité d'une protection contre la foudre pour une structure doit être évaluée afin de réduire la perte des valeurs sociales L1, L2 et L3.

Afin de déterminer le besoin ou non d'une protection contre la foudre d'une structure, une évaluation des risques doit être faite conformément aux méthodes données dans la CEI 62305-2. Les types de risques suivants doivent être pris en compte en fonction des types de pertes définis en 5.2 :

- $R_1$  : risque de perte de vie humaine ou de blessure définitive ;
- $R_2$  : risque de perte de service public ;
- $R_3$  : risque de perte d'héritage culturel.

NOTE Il convient d'évaluer le risque  $R_4$  : risque de perte de valeurs économiques, lorsqu'il convient d'évaluer le besoin économique de protection contre la foudre (voir paragraphe 6.2).

La protection contre la foudre est nécessaire si le risque  $R$  ( $R_1$  à  $R_3$ ) est supérieur au niveau de risque tolérable  $R_T$

$$R > R_T$$

Dans ce cas, des mesures de protection doivent être appliquées afin de réduire le risque  $R$  ( $R_1$  à  $R_3$ ) à la valeur du risque tolérable  $R_T$ .

$$R \leq R_T$$

Si plus d'un type de perte peut apparaître dans une structure à protéger, la condition  $R \leq R_T$  doit être satisfaite pour chaque type de perte (L1, L2 et L3).

Il convient que les valeurs de risque tolérable  $R_T$  aboutissant à la perte de valeurs sociales soient de la responsabilité des organisations nationales concernées.

NOTE 1 Une autorité compétente peut spécifier le besoin d'une protection contre la foudre pour des applications particulières sans recourir à une méthode d'évaluation des risques. Dans ce cas, le niveau de protection contre la foudre sera prescrit par cette autorité. Parfois, une évaluation des risques peut être une technique de justification de ces exigences.

NOTE 2 Des informations plus complètes sur l'évaluation des risques et sur les méthodes de choix des mesures de protection sont données dans la CEI 62305-2.

## 6.2 Besoin économique d'une protection contre la foudre

En complément d'une protection contre la foudre pour la structure à protéger, il peut être utile d'évaluer les bénéfices économiques des mesures de protection afin de réduire la perte économique L4.

Dans ce cas, il convient d'évaluer le risque  $R_4$  de perte de valeurs économiques. L'évaluation du risque  $R_4$  permet le calcul du coût des pertes économiques avec et sans les mesures de protection.

La protection contre la foudre est rentable si la somme du coût  $C_{RL}$  des pertes résiduelles en présence des mesures de protection et du coût  $C_{PM}$  des mesures de protection est inférieure au coût total  $C_L$  des pertes sans mesures de protection.

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

NOTE Des informations plus complètes sur l'évaluation du besoin économique de protection contre la foudre sont données dans la CEI 62305-2.

## 7 Mesures de protection

Des mesures de protection peuvent être prises pour réduire le risque conformément au type de dommage.

### 7.1 Mesures de protection pour réduire les blessures des personnes dues aux chocs électriques

Les mesures de protection possibles comprennent :

- une isolation appropriée des éléments conducteurs exposés ;
- une équipotentialité par un réseau de terre maillé ;
- des restrictions physiques et des panneaux d'avertissement ;
- liaison équipotentielle de foudre (EB).

NOTE 1 L'équipotentialité et une augmentation de la résistivité de surface du sol dans et à l'extérieur de la structure peuvent réduire le danger de mort (voir la CEI 62305-3, Article 8).

NOTE 2 L'utilisation de détecteurs d'orage peut réduire le danger de mort.

### 7.2 Mesures de protection pour réduire les dommages physiques

La protection est assurée par le système de protection contre la foudre (SPF) qui comprend :

- Dispositif de capture
- Conducteurs de descente

- Prise de terre
- Liaison équipotentielle de foudre (EB)
- Isolation électrique (avec distance de séparation) de l'installation extérieure de SPF

NOTE 1 Si un SPF est installé, l'équipotentialité est une mesure très importante pour réduire les dangers d'incendie, d'explosion et de mort. Pour plus d'informations, voir la CEI 62305-3.

NOTE 2 Des dispositions limitant le développement et la propagation d'un incendie telles que compartiments étanches, extincteurs, hydratants, installations de détection et d'extinction d'incendie, peuvent réduire les dommages physiques.

NOTE 3 Des chemins d'évacuation protégés assurent la protection des personnes.

### **7.3 Mesures de protection pour réduire les défaillances des réseaux de puissance et de communication**

Les mesures de protection possibles comprennent :

- mise à la terre et équipotentialités ;
- écran magnétique ;
- cheminement des réseaux ;
- interfaces d'isolement ;
- parafoudres coordonnés.

Ces mesures peuvent être utilisées séparément ou associées.

NOTE L'utilisation de détecteurs d'orage peut réduire les défaillances des réseaux de puissance et de communication.

### **7.4 Choix des mesures de protection**

Toutes les mesures de protection répertoriées en 7.1, 7.2 et 7.3 constituent ensemble la protection générale contre la foudre.

Le choix des mesures de protection les plus appropriées doit être fait par le concepteur des mesures de protection et le propriétaire de la structure à protéger en tenant compte du type et du coût de chaque dommage, et des aspects techniques et économiques des diverses mesures de protection.

Les critères pour l'évaluation des risques et pour le choix des mesures de protection les plus appropriées sont donnés dans la CEI 62305-2.

Les mesures de protection sont efficaces si elles satisfont aux exigences des normes applicables et sont aptes à résister aux contraintes prévues à l'emplacement dans l'installation.

## **8 Critère de base pour la protection des structures**

Les critères idéaux pour la protection des structures seraient d'enfermer la structure à protéger dans un écran parfaitement conducteur mis à la terre d'épaisseur appropriée, et de réaliser la liaison à l'écran des services connectés à la structure au point de pénétration dans la structure.

Ainsi, il serait possible d'empêcher la pénétration du courant de foudre et du champ électromagnétique associé dans la structure à protéger afin d'éviter des effets thermiques et électrodynamiques dangereux du courant, ainsi que des étincelles dangereuses et des surtensions pour les réseaux internes.

En pratique, il est souvent ni possible ni réalisable à coût réduit d'obtenir de telles mesures assurant une telle protection maximale.

La discontinuité de l'écran et/ou son épaisseur non appropriée permet la pénétration du courant de foudre entraînant :

- des dommages physiques et des dangers de mort ;
- des défaillances des réseaux internes.

Les mesures de protection adoptées pour réduire ces dommages et les pertes consécutives doivent être prises pour le domaine des paramètres du courant de foudre prévu relatif au niveau de protection.

### 8.1 Niveaux de protection contre la foudre (NPF)

Pour les besoins de la présente norme, quatre niveaux de protection contre la foudre (I à IV) sont définis. Pour chaque niveau de protection contre la foudre (NPF), des paramètres minimaux et maximaux de courant de foudre sont définis.

NOTE 1 La protection contre la foudre dont les paramètres minimaux et maximaux de courant de foudre dépassent ceux du niveau de protection I nécessite de prendre des mesures plus efficaces qu'il convient de choisir et de mettre en œuvre sur une base individuelle.

NOTE 2 La probabilité d'apparition de coup de foudre dont les paramètres minimaux et maximaux de courant de foudre dépassent ceux du niveau de protection I est inférieure à 2 %.

Pour le Niveau de protection I, les valeurs maximales des paramètres du courant de foudre ne seront pas dépassées, avec une probabilité de 99 %. Selon le rapport de polarité (voir l'Article A.2), les valeurs issues des coups positifs auront des probabilités inférieures à 10 %, celles issues des coups négatifs resteront inférieures à 1 % (voir l'Article A.3).

Les valeurs maximales des paramètres du courant de foudre du Niveau de protection I sont réduites de 75 % pour le Niveau II et de 50 % pour les Niveaux III et IV (linéaires pour  $I$ ,  $Q$  et  $di/dt$ , quadratiques pour  $W/R$ ). Les paramètres temporels sont inchangés.

NOTE 3 Les niveaux de protection contre la foudre dont les paramètres minimaux et maximaux de courant de foudre sont inférieurs à ceux du niveau de protection IV permettent de considérer des valeurs de probabilité de dommage supérieures à celles spécifiées dans l'Annexe B de la CEI 62305-2. Même si elles ne sont pas quantifiées, elles sont utiles pour améliorer la personnalisation des mesures de protection pour éviter des coûts injustifiés.

Les valeurs maximales des paramètres du courant de foudre pour les différents niveaux de protection sont données dans le Tableau 3 et sont utilisées pour la conception des composants de protection contre la foudre (par exemple section des conducteurs, épaisseur des feuilles de métal, tenue au courant des parafoudres, distances de séparation des étincelles dangereuses) et pour définir les paramètres d'essai de simulation des effets de la foudre sur ces composants (voir Annexe D).

Les valeurs minimales du courant de foudre pour les différents niveaux de protection sont utilisées pour en déduire le rayon de la sphère fictive (voir l'Article A.4) afin de définir la zone de protection contre la foudre ZPF  $O_B$  qui ne peut être atteinte par un coup de foudre direct (voir 8.2 et Figures 3 et 4). Les valeurs minimales des paramètres du courant de foudre associées au rayon de la sphère fictive sont données dans le Tableau 4. Elles sont utilisées pour l'emplacement des dispositifs de capture et pour définir la zone de protection ZPF  $O_B$  (voir 8.2).

**Tableau 3 – Valeurs maximales des paramètres de foudre correspondant aux niveaux de protection contre la foudre**

Premier choc court positif			Niveau de protection contre la foudre			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	I	II	III	IV

Courant crête	$I$	kA	200	150	100
Charge du choc court	$Q_{\text{short}}$	C	100	75	50
Energie spécifique	$W/R$	MJ/ $\Omega$	10	5,6	2,5
Paramètres temporels	$T_1/T_2$	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	10 / 350		
<b>Premier choc court négatif <sup>1)</sup></b>			<b>Niveau de protection contre la foudre</b>		
Courant crête	$I$	kA	100	75	50
Raideur moyenne	$di/dt$	kA/ $\mu\text{s}$	100	75	50
Paramètres temporels	$T_1 / T_2$	$\mu\text{s} / \mu\text{s}$	1 / 200		
<b>Choc court consécutif</b>			<b>Niveau de protection contre la foudre</b>		
<b>Paramètres du courant</b>	<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b> <b>IV</b>
Courant crête	$I$	kA	50	37,5	25
Raideur moyenne	$di/dt$	kA/ $\mu\text{s}$	200	150	100
Paramètres temporels	$T_1/T_2$	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	0,25 / 100		
<b>Choc long</b>			<b>Niveau de protection contre la foudre</b>		
<b>Paramètres du courant</b>	<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b> <b>IV</b>
Charge du choc long	$Q_{\text{long}}$	C	200	150	100
Paramètre temporel	$T_{\text{long}}$	s	0,5		
<b>Eclair</b>			<b>Niveau de protection contre la foudre</b>		
<b>Paramètres du courant</b>	<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b> <b>IV</b>
Charge éclair	$Q_{\text{flash}}$	C	300	225	150
1) Cette forme d'onde n'est utilisée que pour les calculs et pas pour les essais					

**Tableau 4 – Valeurs minimales des paramètres de foudre et rayon de sphère fictive associé correspondant aux niveaux de protection contre la foudre**

Critère d'interception			Niveau de protection contre la foudre			
	Symbole	Unité	I	II	III	IV
Courant crête minimal	$I$	kA	3	5	10	16
Rayon de sphère fictive	$r$	m	20	30	45	60

A partir de la distribution statistique donnée à la Figure A.5, une probabilité moyenne peut être définie, les paramètres du courant de foudre étant plus petits que les valeurs maximales et respectivement plus élevés que les valeurs minimales définies pour chaque niveau de protection (voir Tableau 5).

**Tableau 5 – Probabilités des limites des paramètres du courant de foudre**

Probabilité pour que les paramètres de courant foudre soient	Niveau de protection contre la foudre			
	I	II	III	IV
Inférieurs aux valeurs maximales définies dans le Tableau 5	0,99	0,98	0,95	0,95
Supérieurs aux valeurs minimales définies dans le Tableau 6	0,99	0,97	0,91	0,84

Les mesures de protection spécifiées dans la CEI 62305-3 et dans la CEI 62305-4 sont efficaces si les paramètres du courant de foudre sont dans le domaine du niveau de protection défini par le concepteur. C'est pourquoi l'efficacité d'une mesure de protection est supposée égale à la probabilité pour que les paramètres soient dans ce domaine.

## 8.2 Zones de protection contre la foudre (ZPF)

Les mesures de protection telles que SPF, blindage, écrans magnétiques et parafoudres déterminent les zones de protection contre la foudre (ZPF).

Une ZPF en aval d'une mesure de protection est caractérisée par une réduction significative des contraintes électromagnétiques dues à la foudre, par comparaison avec la ZPF amont.

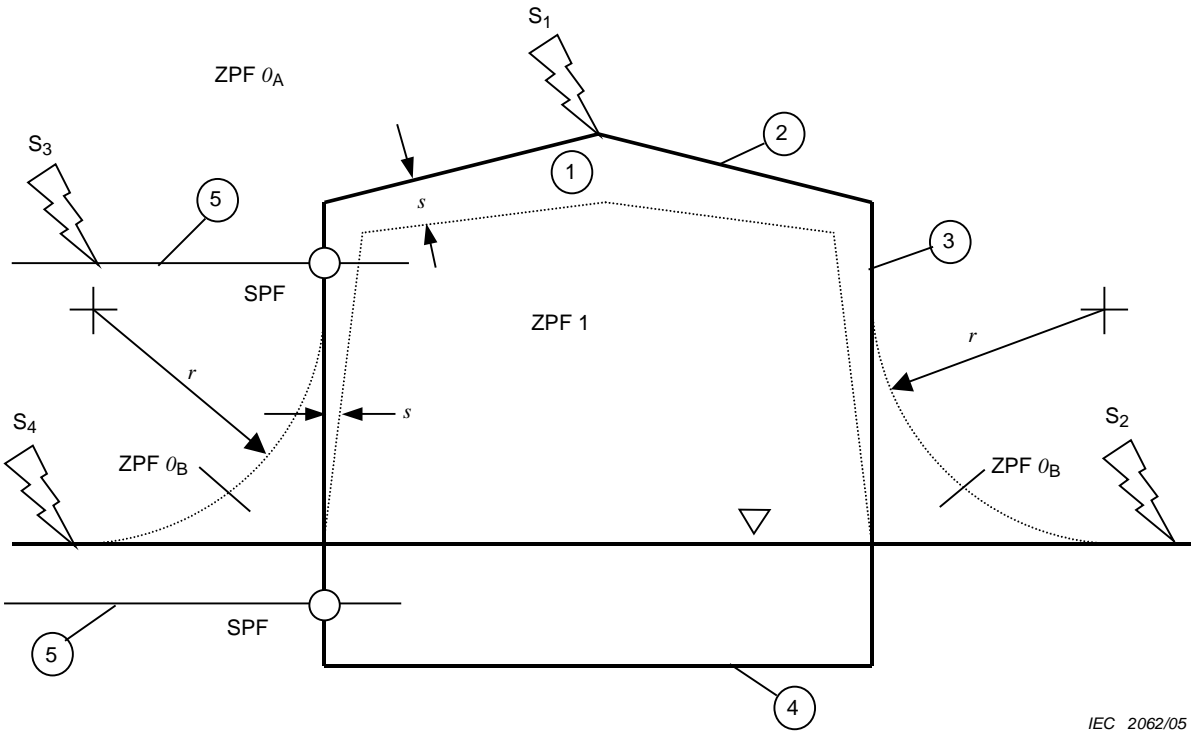
En fonction de la menace de foudre, les ZPF suivantes sont définies (voir Figures 3 et 4) :

- |               |   |
|---------------|---|
| ZPF $O_A$     | zone exposée aux coups de foudre directs et au champ électromagnétique total. Les réseaux internes peuvent être soumis à des courants de choc pleins ou partiels ;  |
| ZPF $O_B$     | zone protégée contre les coups de foudre directs mais où le risque vient du champ électromagnétique total. Les réseaux internes peuvent être soumis à des courants de choc partiels ;   |
| ZPF 1         | zone où le courant de choc est limité par le partage du courant et par les interfaces d'isolement et/ou les parafoudres mis en œuvre à la frontière. L'écran spatial peut atténuer le champ électromagnétique de foudre ;                             |
| ZPF 2, ..., n | zone où le courant de choc peut être encore limité par le partage du courant et par les interfaces d'isolement et/ou les parafoudres mis en œuvre à la frontière. Un écran spatial supplémentaire peut atténuer le champ électromagnétique de foudre. |

NOTE 1 En règle générale, plus la ZPF est de rang élevé, plus les paramètres d'environnement électromagnétique sont faibles.

La règle générale de protection est que la structure à protéger doit être contenue dans une ZPF dont les caractéristiques électromagnétiques sont compatibles avec la tenue de la structure aux contraintes entraînant les dommages à réduire (dommages physiques, défaillances des réseaux de puissance et de communication dues à des surtensions).

NOTE 2 Pour la plupart des réseaux de puissance et de communication et les matériels, une information sur la tenue de choc peut être fournie par le constructeur.



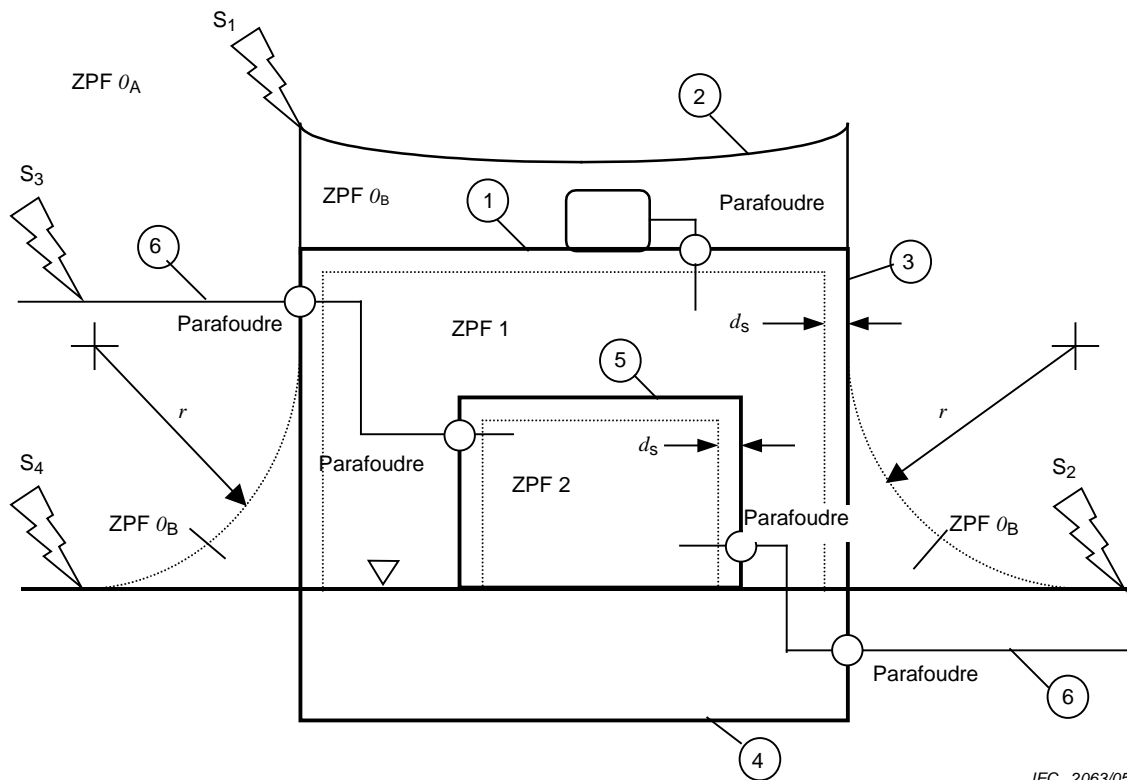
IEC 2062/05

1	Structure	S1	Impact sur la structure
2	Dispositif de capture	S2	Impact près de la structure
3	Conducteurs de descente	S3	Impact sur un service connecté à la structure
4	Prise de terre	S4	Impact près d'un service connecté à la structure
5	Services entrants	$r$	Rayon de la sphère fictive
		$s$	Distance de séparation contre un étincelage dangereux

	Niveau du sol
	Liaison équipotentielle de foudre au moyen d'un parafoudre
ZPF $0_A$	Coups de foudre directs. Courant de foudre total
ZPF $0_B$	Pas de coups de foudre directs. Courant de foudre partiel ou courant induit
ZPF 1	Pas de coups de foudre directs. Courant de foudre limité ou courant induit
	Il faut que le volume protégé dans la ZPF1 respecte la distance de séparation $s$

Figure 3 – Zones de protection contre la foudre (ZPF) définies par un SPF (CEI 62305-3)





IEC 2063/05

1	Structure (écran de la ZPF 1)	S1	Impact sur la structure
2	Dispositif de capture	S2	Impact à proximité de la structure
3	Conducteurs de descente	S3	Impact sur un service connecté à la structure
4	Prise de terre	S4	Impact à proximité d'un service connecté à la structure
5	Services entrants (écran de la ZPF 2)	r	Rayon de la sphère fictive
6	Services connectés à la structure	ds	Distance de sécurité contre un champ magnétique trop élevé

▽ Niveau du sol

○ Liaison équipotentielle de foudre au moyen d'un parafoudre

ZPF 0A Coups de foudre directs, courant de foudre plein, champ magnétique plein

ZPF 0B Pas de coups de foudre directs, courant de foudre partiel ou courant induit, champ magnétique plein

ZPF 1 Pas de coups de foudre directs, courant de foudre limité ou courant induit, champ magnétique atténué

ZPF 2 Pas de coups de foudre directs, courants induits, champ magnétique plus atténué

Il faut que les volumes protégés dans les ZPF 1 et ZPF 2 respectent les distances de sécurité  $d_s$

**Figure 4 – ZPF définies par les mesures de protection contre l'IMF  
(CEI 62305-4)**

### 8.3 Protection des structures

#### 8.3.1 Protection contre les dommages physiques et le danger de mort

La structure à protéger doit être intégrée dans la ZPF 0B ou de niveau supérieur. Cela est réalisé par la mise en œuvre d'un système de protection contre la foudre (SPF).

Un SPF se compose d'une installation extérieure et d'une installation intérieure contre la foudre.

Les fonctions du SPF extérieur sont

- d'intercepter un coup de foudre direct sur la structure (par un dispositif de capture),
- d'écouler de manière sûre le courant de foudre vers la terre (par des conducteurs de descente),
- de le disperser dans la terre (par la prise de terre).

La fonction du SPF intérieur est d'empêcher tout étincelage dangereux dans la structure en utilisant soit des liaisons équipotentielles, soit des distances de séparation,  $s$  (associées à l'isolation électrique) entre les composants du SPF et les éléments conducteurs électriques internes de la structure.

Quatre types de SPF sont définis (I, II, III, IV) pour les règles de construction, en se fondant sur les niveaux de protection correspondants. Chaque type comprend des règles de construction dépendantes (par exemple rayon de la sphère fictive, largeur de maille, etc.) et indépendantes (par exemple sections, matériaux, etc.) du niveau.

Si la résistivité de surface du sol à l'extérieur, et du plancher à l'intérieur de la structure n'est pas suffisamment élevée, un danger de mort existe en raison des tensions de contact et de pas qui peuvent être réduites par :

- à l'extérieur de la structure, isolation des éléments conducteurs, équipotentialité du sol au moyen d'un réseau maillé de terre, des panneaux d'avertissement et des restrictions physiques ;
- à l'intérieur de la structure, équipotentialité des services au point de pénétration dans la structure.

Le SPF doit être conforme aux exigences de la CEI 62305-3.

### 8.3.2 Protection contre les défaillances des réseaux internes

La protection contre l'IEMF pour réduire le risque de défaillances des réseaux internes doit limiter :

- les surtensions dues aux coups de foudre sur la structure en raison du couplage résistif et inductif ;
- les surtensions dues aux coups de foudre à proximité de la structure en raison du couplage inductif ;
- les surtensions transmises par les services connectés à la structure en raison des coups de foudre sur ou à proximité de ces services ;
- le champ magnétique à couplage direct avec les matériels.

NOTE Les défaillances des matériels dues aux effets du champ magnétique se couplant directement avec le matériel sont rares pourvu que les matériels des réseaux soient conformes aux ondes de radio-fréquence émises et aux essais d'immunité définis par les normes CEM des produits (voir la CEI 62305-2 et la CEI 62305-4).

Le réseau à protéger doit être à l'intérieur de la ZPF 1 ou de niveau supérieur. Cela est réalisé par des mesures de protection de réseau de puissance et de communication (PRPC) comprenant des écrans magnétiques atténuant les champs magnétiques induits et/ou par un cheminement approprié des canalisations réduisant les boucles d'induction. La liaison des parties métalliques et des réseaux traversant la ZPF doit être prévue aux frontières des ZPF soit par conducteurs, soit par parafoudres.

Les mesures de protection applicables à toute ZPF doivent être conformes à la CEI 62305-4.

Une protection efficace contre les surtensions, entraînant des défaillances des réseaux internes, peut aussi être réalisée par des interfaces d'isolement et/ou des parafoudres coordonnés limiteurs de surtension à un niveau inférieur à la tension assignée de choc du réseau à protéger.

Les interfaces d'isolement et les parafoudres doivent être choisis et mis en œuvre conformément aux exigences de la CEI 62305-4.

## Annexe A (informative)

### Paramètres du courant de foudre

#### A.1 Eclairs à la terre

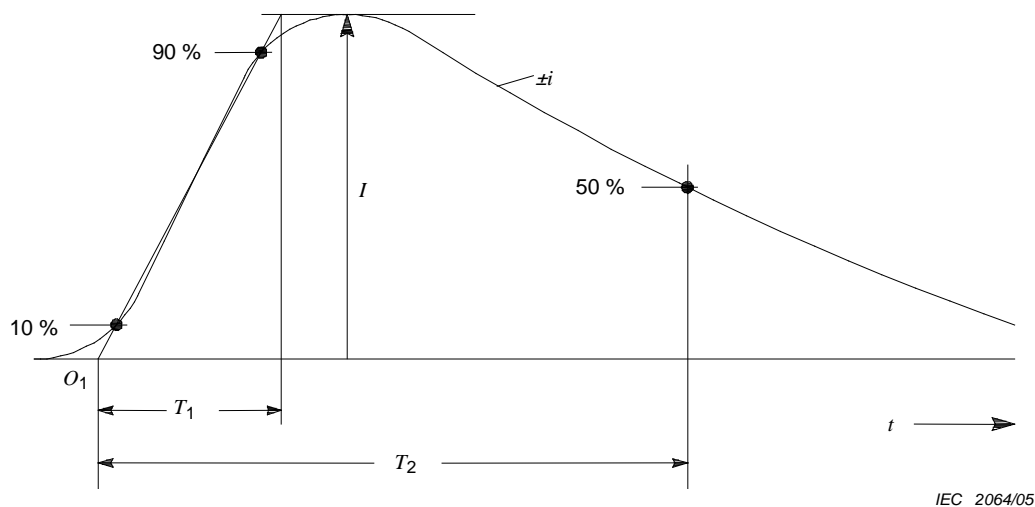
Deux types essentiels d'éclairs existent :

- les éclairs descendants initiés par un précurseur descendant depuis le nuage vers la terre ;
- les éclairs ascendants initiés par un précurseur ascendant depuis une structure au sol vers le nuage.

Dans des environnements plats et pour des structures peu élevées, des éclairs descendants apparaissent essentiellement, tandis que pour des environnements exposés et/ou pour des structures élevées, les éclairs ascendants deviennent dominants. La probabilité d'impact direct augmente avec la hauteur réelle des structures (voir la CEI 62305-2, Annexe A) et les conditions physiques sont modifiées.

Le courant de foudre comprend un ou plusieurs chocs :

- les chocs courts de durée inférieure à 2 ms (Figure A.1) ;
- les chocs longs de durée supérieure à 2 ms (Figure A.2).



#### Légende

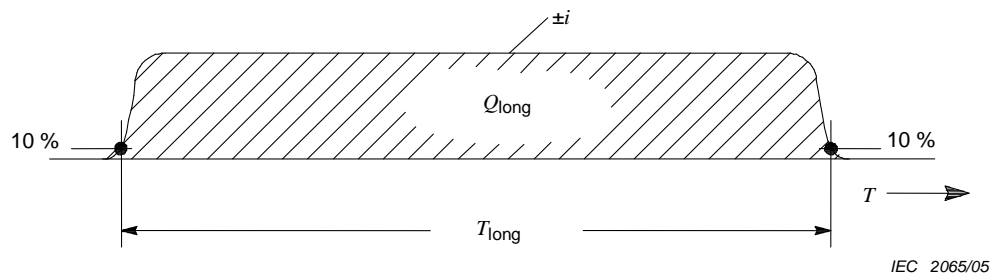
$O_1$  origine virtuelle

$I$  courant crête

$T_1$  durée du front

$T_2$  temps jusqu'à mi-valeur

**Figure A.1 – Définitions des paramètres d'un choc court (typiquement  $T_2 < 2$  ms )**

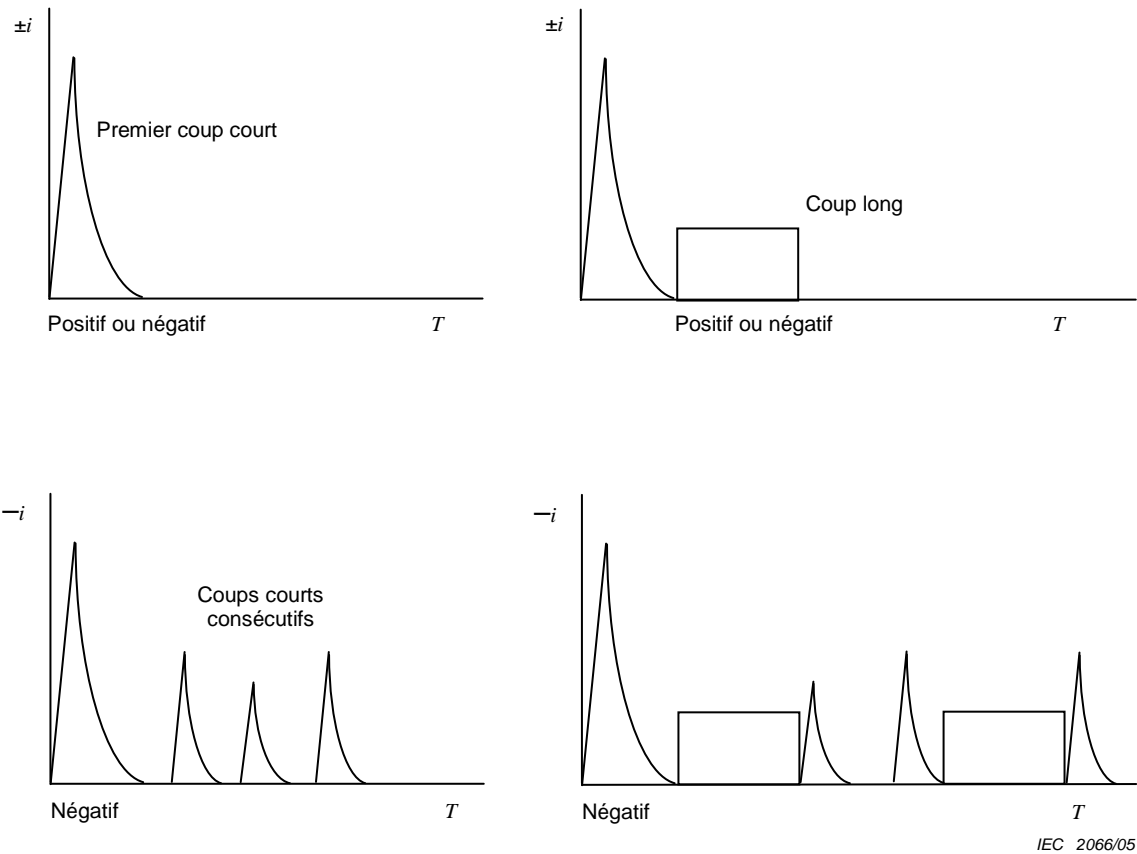


**Légende**

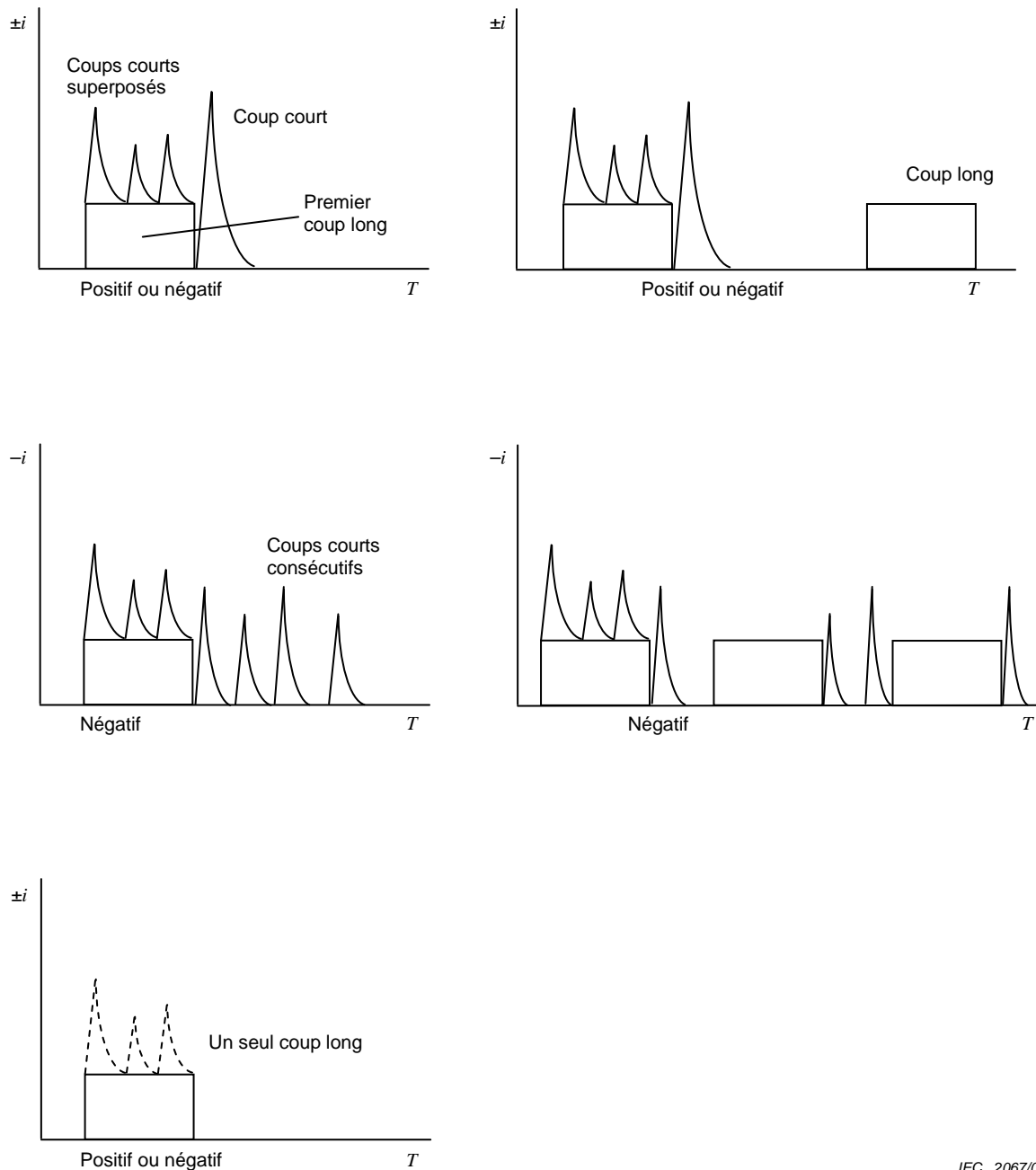
- $T_{long}$  durée
- $Q_{long}$  charge d'un choc long

**Figure A.2 – Définitions des paramètres d'un choc long (typiquement  $2\text{ ms} < T_{long} < 1\text{ s}$ )**

Une différence complémentaire des coups vient de leur polarité (positive ou négative) et de leur emplacement lors de l'éclair (premier, consécutif, superposé). Les composantes possibles sont indiquées à la Figure A.3 pour les éclairs descendants et à la Figure A.4 pour les éclairs ascendants.



**Figure A.3 – Composantes possibles d'éclairs descendants (typiques en environnement plat et sur des structures peu élevées)**



IEC 2067/05

**Figure A.4 – Composantes possibles d'éclairs ascendants (typiques sur des structures exposées et/ou élevées)**

La composante supplémentaire dans un éclair ascendant est le premier coup long avec ou non jusqu'à une dizaine de coups superposés. Mais, tous les paramètres d'un coup court d'éclair ascendant sont inférieurs à ceux d'éclairs descendants. Une charge supérieure d'un coup long d'éclairs ascendants n'est pas confirmée à ce jour. Toutefois, les paramètres de courant de foudre des éclairs ascendants sont considérés comme couverts par les valeurs maximales des éclairs descendants. Une évaluation plus précise des paramètres de courant de foudre et leur dépendance vis-à-vis des hauteurs tant pour les éclairs ascendants que descendants sont à l'étude.

## A.2 Paramètres du courant de foudre

Les paramètres du courant de foudre dans la présente norme se fondent sur les résultats du Conseil International des Grands Réseaux Electriques (CIGRE) donnés dans le Tableau A.1. Leur distribution statistique peut être considérée comme une distribution logarithmique normale. La valeur moyenne correspondante  $\mu$  et la dispersion  $\sigma_{\log}$  sont données dans le Tableau A.2 et la fonction de distribution est présentée à la Figure A.5. Sur cette base, la probabilité d'apparition de toute valeur de chacun des paramètres peut être déterminée.

Un rapport de polarité de 10 % de coups positifs et de 90 % de coups négatifs est admis. La valeur de la probabilité d'apparition d'une valeur crête de courant de foudre supérieure à la valeur considérée précédemment est indiquée dans le Tableau A.3. Le rapport de polarité est fonction de l'environnement. En cas d'absence d'informations locales, il convient de prendre le rapport donné.

**Tableau A.1 – Valeurs des paramètres du courant de foudre de la CIGRE  
(Electra N° 41 ou N° 69\*)[3], [4]**

Paramètre	Valeur fixée pour le niveau I	Valeurs			Type de coup	Ligne de la Figure A.5
		95 %	50 %	5 %		
$I$ (kA)	50 200	4 (98 %)	20 (80%)	90	*Premier court négatif	1A+1B
		4,9	11,8	28,6	*Court consécutif négatif	2
		4,6	35	250	Premier court positif (seul)	3
$Q_{\text{flash}}$ (C)	300	1,3	7,5	40	Éclair négatif	4
		20	80	350	Éclair positif	5
$Q_{\text{short}}$ (C)	100	1,1	4,5	20	Premier court négatif	6
		0,22	0,95	4	Court consécutif négatif	7
		2	16	150	Premier court positif (seul)	8
$W/R$ (kJ/ $\Omega$ )	10 000	6	55	550	Premier court négatif	9
		0,55	6	52	Court consécutif négatif	10
		25	650	15 000	Premier court positif	11
$di/dt_{\text{max}}$ (kA/ $\mu$ s)	20	9,1	24,3	65	*Premier court négatif	12
		9,9	39,9	161,5	*Court consécutif négatif	13
		0,2	2,4	32	Premier court positif	14
$di/dt_{30/90\%}$ (kA/ $\mu$ s)	200	4,1	20,1	98,5	*Court consécutif négatif	15
$Q_{\text{long}}$ (C)	200				Long	
$t_{\text{long}}$ (s)	0,5				Long	
Durée du front ( $\mu$ s)		1,8	5,5	18	Premier court négatif	
		0,22	1,1	4,5	Court consécutif négatif	
		3,5	22	200	Premier court positif (seul)	
Durée de choc ( $\mu$ s)		30	75	200	Premier court négatif	
		6,5	32	140	Court consécutif négatif	
		25	230	2 000	Premier court positif (seul)	
Intervalle de temps (ms)		7	33	150	Coups négatifs multiples	
Durée totale éclair (ms)		0,15	13	1 100	Éclair négatif (tous)	
		31	180	900	Eclair négatif (sans simple)	
		14	85	500	Eclair positif	

NOTE Les valeurs  $I = 4$  kA et  $I = 20$  kA correspondent respectivement aux probabilités de 98 % et de 80 %.

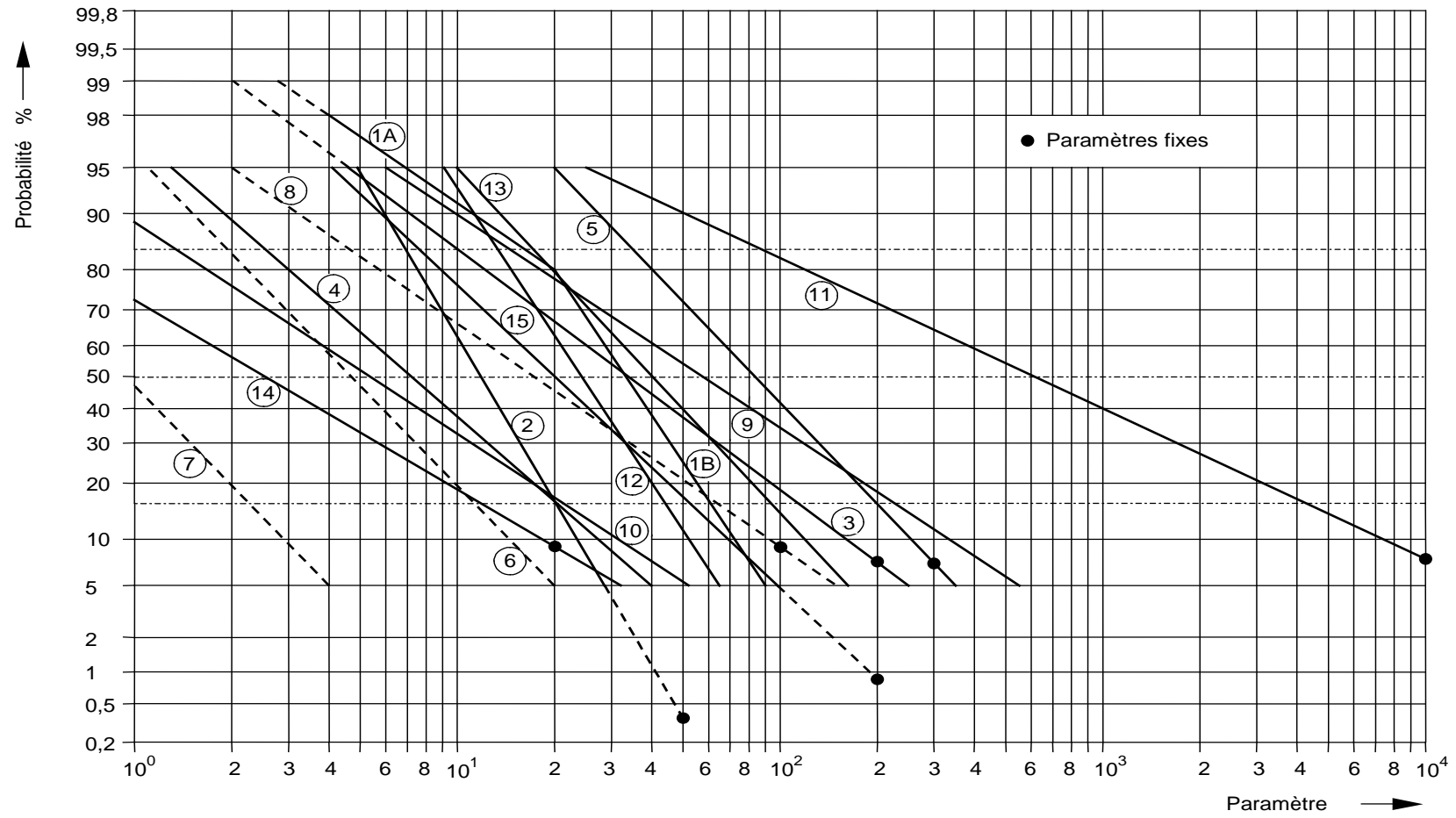
**Tableau A.2 – Distribution logarithmique normale des paramètres de courant de foudre  
– Valeurs moyennes  $\mu$  et de dispersion  $\sigma_{\log}$  calculées pour 95 % et 5 % à partir de  
CIGRE (Electra N° 41 ou N° 69) [3], [4]**

Paramètre	Moyenne $\mu$	Dispersion $\sigma_{\log}$	Type de choc	Ligne de la Figure A.5
$I$ (kA)	(61,1)	0,576	*Premier court négatif (80 %)	1A
	33,3	0,263	*Premier court négatif (80 %)	1B
	11,8	0,233	*Négatif court consécutif	2
	33,9	0,527	Premier court positif (seul)	3
$Q_{\text{flash}}$ (C)	7,21	0,452	Éclair négatif	4
	83,7	0,378	Eclair positif	5
$Q_{\text{short}}$ (C)	4,69	0,383	Premier court négatif	6
	0,938	0,383	Négatif court consécutif	7
	17,3	0,570	Premier court positif (seul)	8
$W/R$ (kJ/ $\Omega$ )	57,4	0,596	Premier court négatif	9
	5,35	0,600	Négatif court consécutif	10
	612	0,844	Premier court positif	11
$di/dt_{\text{max}}$ (kA/ $\mu$ s)	24,3	0,260	*Premier court négatif	12
	40,0	0,369	*Court consécutif négatif	13
	2,53	0,670	Premier court positif	14
$di/dt_{30/90\%}$ (kA/ $\mu$ s)	20,1	0,420	*Court consécutif négatif	15
$Q_{\text{long}}$ (C)	200		Long	
$t_{\text{long}}$ (s)	0,5		Long	
Durée du front ( $\mu$ s)	5,69	0,304	Premier court négatif	
	0,995	0,398	Court consécutif négatif	
	26,5	0,534	Premier court positif (seul)	
Durée du choc ( $\mu$ s)	77,5	0,250	Premier court négatif	
	30,2	0,405	Court consécutif négatif	
	224	0,578	Premier court positif (seul)	
Intervalle de temps (ms)	32,4	0,405	Négatifs multiples	
Durée totale éclair (ms)	12,8	1,175	Éclair négatif (tous)	
	167	0,445	Éclair négatif (sans simple)	
	83,7	0,472	Eclair positif	
NOTE $\sigma_{\log} = \log(I_{16\%}) - \log(I_{50\%})$				



**Tableau A.3 – Valeurs de la probabilité  $P$  en fonction du courant de foudre  $I$** 

$I$ (kA)	$P$
0	1
3	0,99
5	0,95
10	0,9
20	0,8
30	0,6
35	0,5
40	0,4
50	0,3
60	0,2
80	0,1
100	0,05
150	0,02
200	0,01
300	0,005
400	0,002
600	0,001



NOTE Pour la numérotation des courbes, voir les Tableaux A.1 et A.2.

**Figure A.5 – Fréquence de distribution cumulative des paramètres du courant de foudre (valeurs de 95 % à 5 %)**

Toutes les valeurs, fixées pour un niveau de protection, données dans la présente norme se rapportent tant aux éclairs descendants que ascendants.

NOTE Les valeurs des paramètres de foudre sont généralement obtenues par mesures effectuées sur des structures de grande hauteur. La distribution statistique des valeurs crête du courant de foudre ne considérant pas les structures de grande hauteur peut également être obtenue par des systèmes locaux de détection.

### A.3 Détermination des valeurs maximales du courant de foudre pour un niveau de protection I

Les effets mécaniques de la foudre sont liés à la valeur crête du courant ( $I$ ) et à l'énergie spécifique ( $W/R$ ). Les effets thermiques sont liés à l'énergie spécifique ( $W/R$ ) lorsqu'un couplage résistif a lieu et à la charge ( $Q$ ) si des arcs se produisent dans l'installation. Des surtensions et des étincelles dangereuses dues à un couplage inductif sont liées à la raideur moyenne ( $di/dt$ ) du courant de montée.

Chacun de ces paramètres ( $I$ ,  $Q$ ,  $W/R$ ,  $di/dt$ ) a tendance à être prééminent lors de chaque mécanisme de défaillance. Cela doit être pris en compte lors de l'élaboration des procédures d'essai.

#### A.3.1 Coup court positif et choc long

Les valeurs  $I$ ,  $Q$ ,  $W/R$  liées aux effets mécaniques et thermiques sont déterminées à partir d'éclairs positifs (car 10 % de leurs valeurs sont beaucoup plus élevés que les 1 % correspondant des éclairs négatifs). A partir de la Figure A.5 (lignes 3, 5, 8, 11 et 14), les valeurs suivantes, avec des probabilités inférieures à 10 %, peuvent être prises :

$I$	=	200 kA
$Q_{\text{flash}}$	=	300 C
$Q_{\text{short}}$	=	100 C
$W/R$	=	10 MJ/ $\Omega$
$di/dt$	=	20 kA/ $\mu$ s

Pour un premier coup court positif conformément à la Figure A.1, ces valeurs donnent une première approximation du temps de montée :

$$T_1 = I / (di/dt) = 10 \mu\text{s} \quad (T_1 \text{ présente peu d'intérêt})$$

Pour un coup avec retard exponentiel, la formule suivante est applicable pour calculer une valeur approchée de charge et d'énergie ( $T_1 \ll T_2$ ) :

$$Q_{\text{short}} = (1 / 0,7) \times I \times T_2$$

$$W/R = ((1/2)(1/0,7) \times I^2 \times T_2$$

Ces formules associées aux valeurs ci-dessus conduisent à une valeur approchée de durée jusqu'à mi-valeur :

$$T_2 = 350 \mu\text{s}$$

Pour un coup long, sa charge approchée peut être calculée par :

$$Q_{\text{long}} = Q_{\text{flash}} - Q_{\text{short}} = 200 \text{ C}$$

Sa durée, conformément à la Figure A.2, peut être calculée à partir des données du Tableau A.1 comme :

$$T_{\text{long}} = 0,5 \text{ s}$$

### A.3.2 Premier coup court négatif

Pour certains effets de couplage inductif, le premier coup court négatif donne lieu à des tensions induites très élevées, par exemple pour des câbles dans des conduits en béton armé. A partir de la Figure A.5 (lignes 1 et 12), les valeurs suivantes, avec des probabilités inférieures à 1 %, peuvent être prises :

$$I = 100 \text{ kA}$$

$$di/dt = 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Pour un premier coup court négatif conformément à la Figure A.1, ces valeurs donnent une première approximation du temps de montée :

$$T_1 = I / (di/dt) = 1,0 \mu\text{s}.$$

Son temps jusqu'à mi-valeur peut être estimé à partir de la durée des premiers coups courts négatifs :

$$T_2 = 200 \mu\text{s} \quad (T_2 \text{ ne présente pas d'intérêt}).$$

### A.3.3 Coup court consécutif

La valeur maximale de la raideur moyenne  $di/dt$  liée à des étincelles dangereuses dues à un couplage inductif est déterminée à partir de coups courts consécutifs d'éclairs négatifs (car 1 % de leur valeur est nettement supérieur au 1 % des premiers coups négatifs ou leur 10 % correspondant des éclairs positifs). A partir de la Figure A.5 (lignes 2 et 15), les valeurs suivantes peuvent être prises avec des probabilités inférieures à 1 % :

$$I = 50 \text{ kA}$$

$$di/dt = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Pour un coup court consécutif conforme à la Figure A.1, ces valeurs donnent un temps de montée approximatif de :

$$T_1 = I / (di/dt) = 0,25 \mu\text{s}$$

Le temps jusqu'à mi-valeur peut être estimé à partir des durées des coups consécutifs négatifs :

$$T_2 = 100 \mu\text{s} \quad (T_2 \text{ ne présente pas d'intérêt}).$$

## A.4 Détermination des valeurs minimales du courant de foudre

L'efficacité d'interception d'un SPF dépend des valeurs minimales du courant de foudre et du rayon correspondant de la sphère fictive. Les frontières géométriques des zones protégées contre les coups de foudre directs peuvent être déterminées par la méthode de la sphère fictive.

Selon le modèle électrogéométrique, le rayon de la sphère fictive  $r$  (distance de saut final – portée finale) est lié à la valeur crête du courant du premier coup court. Dans le rapport d'un groupe de travail de l'IEEE [5], la relation donnée est :

$$r = 10 \cdot I^{0,65} \quad (\text{A.1})$$

où

$r$  est le rayon de la sphère fictive (m) ;

$I$  est la valeur crête du courant (kA).

Pour un rayon de sphère fictive  $r$ , il peut être supposé que tous les coups de foudre dont la valeur crête est supérieure à la valeur crête correspondante minimale de  $I$  seront interceptés par des dispositifs de capture naturels ou dédiés. C'est pourquoi la probabilité de valeurs crêtes de coups positifs et négatifs des premiers coups donnés à la Figure A.5 (lignes 1A et 3) est supposée correspondre à la probabilité d'interception. En tenant compte du rapport de polarité de 10 % de coups positifs et de 90 % de coups négatifs, la probabilité globale d'interception peut être calculée (voir Tableau 5).

## Annexe B (informative)

### Fonctions temporelles du courant de foudre à des fins d'analyse

Les formes d'ondes du courant :

- du premier coup court positif : 10/350  $\mu\text{s}$
- du premier coup court négatif : 1/200  $\mu\text{s}$
- des coups courts consécutifs négatifs : 0,25/100  $\mu\text{s}$

peuvent être définies par :

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \cdot \exp(-t/\tau_2) \quad (\text{B.1})$$

où

$I$  est le courant crête ;

$k$  est le facteur de correction du courant crête ;

$t$  est le temps ;

$\tau_1$  est la constante du temps de montée ;

$\tau_2$  est la constante de la queue.

Pour les formes d'ondes de courant du premier coup court positif, du premier coup court négatif et des coups courts consécutifs négatifs pour divers niveaux de protection, les paramètres donnés dans le Tableau B.1 sont applicables. Les courbes d'analyse en fonction du temps sont données dans les Figures B.1 à B.6.

**Tableau B.1 – Paramètres pour l'équation B.1**

Paramètres	Coup positif			Premier coup négatif			Coup consécutif négatif		
	Niveau de protection			Niveau de protection			Niveau de protection		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV	I	II	III-IV
$I$ (kA)	200	150	100	100	75	50	50	37,5	25
$k$	0,93	0,93	0,93	0,986	0,986	0,986	0,993	0,993	0,993
$\tau_1$ ( $\mu\text{s}$ )	19	19	19	1,82	1,82	1,82	0,454	0,454	0,454
$\tau_2$ ( $\mu\text{s}$ )	485	485	485	285	285	285	143	143	143

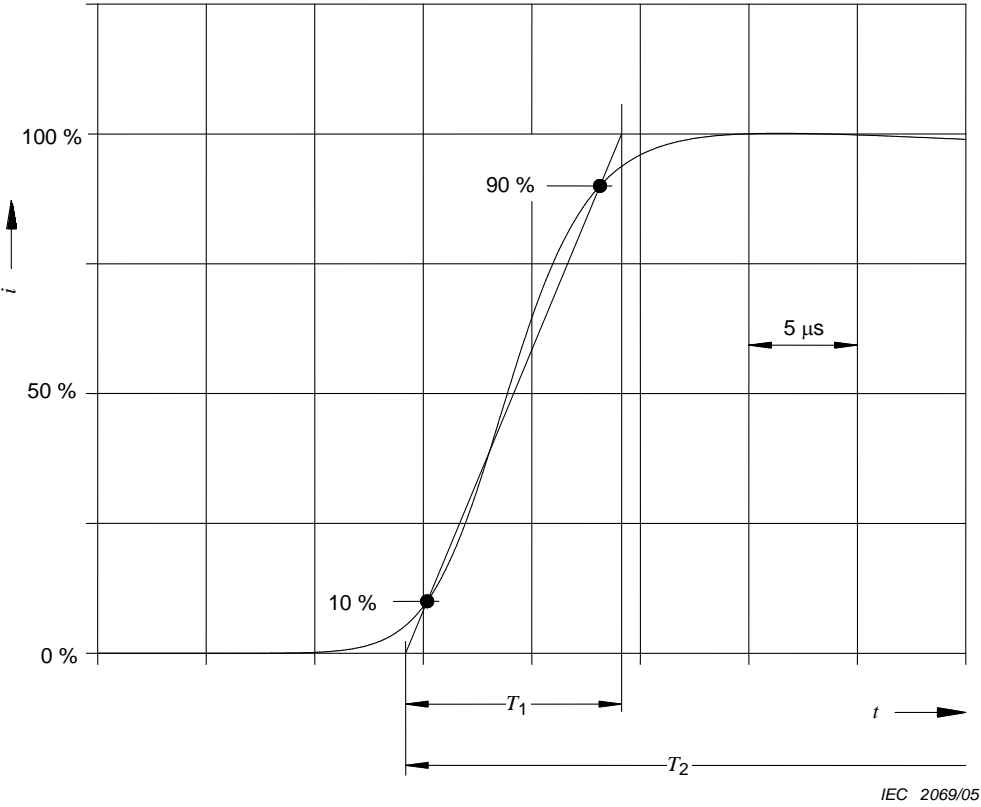


Figure B.1 – Forme d’onde du courant de montée du coup positif

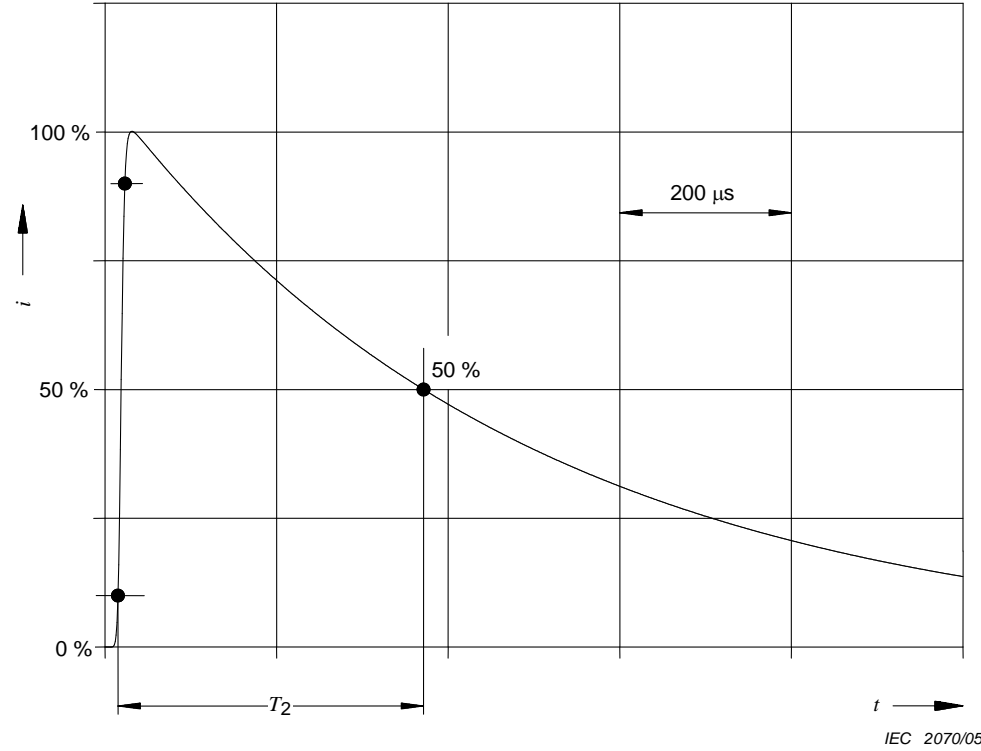


Figure B.2 – Forme d’onde du courant de queue du coup positif

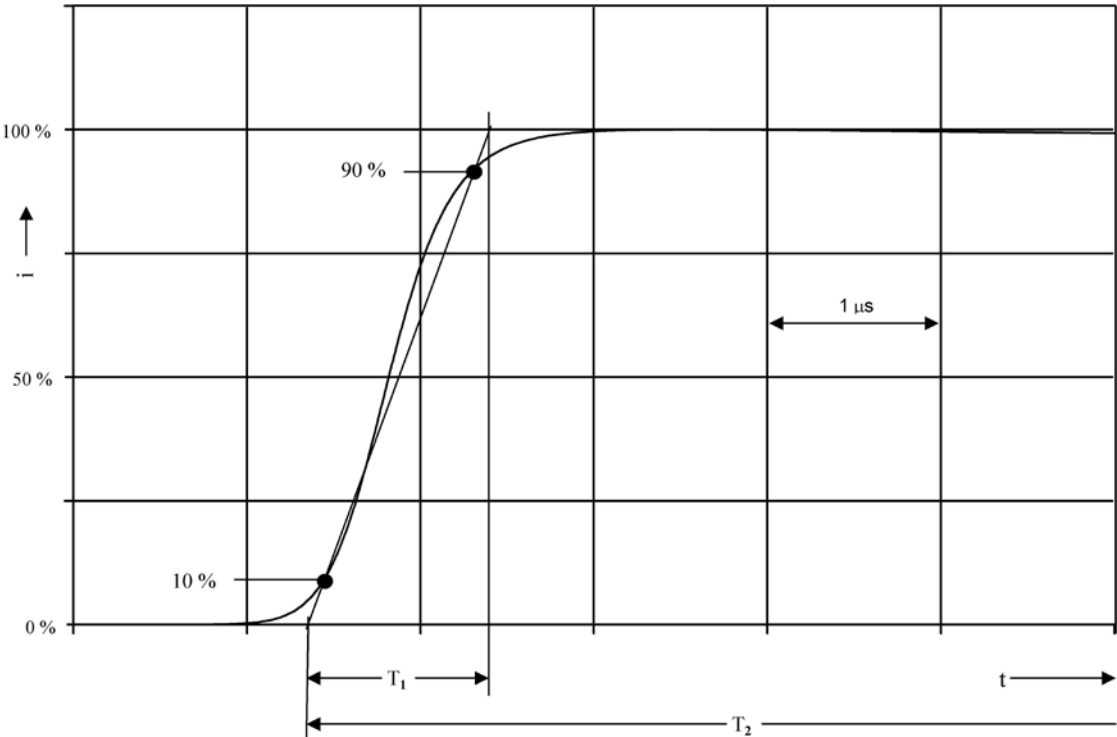


Figure B.3 – Forme d’onde du courant de montée du premier coup négatif

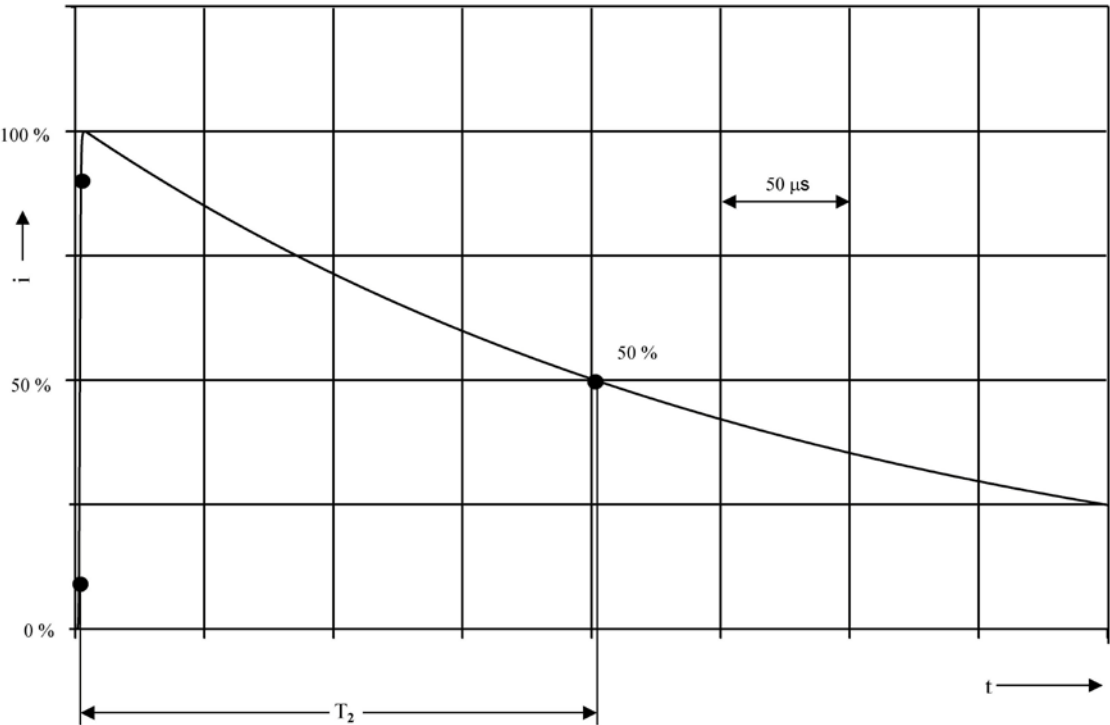


Figure B.4 – Forme d’onde du courant de queue du premier coup négatif



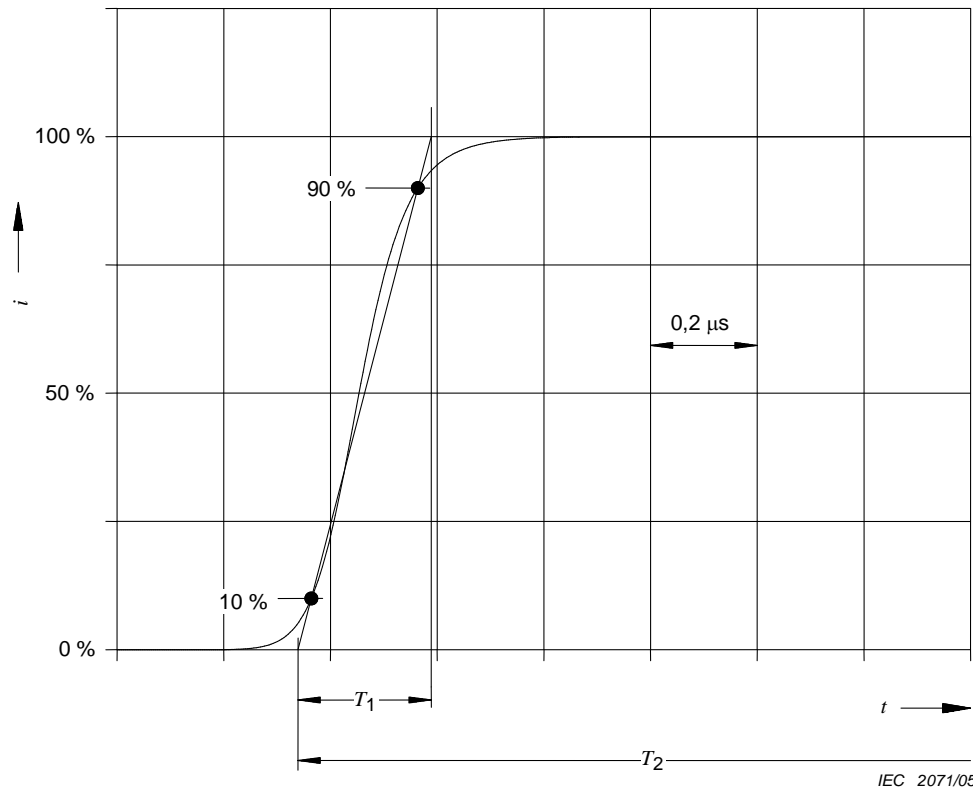


Figure B.5 – Forme d’onde du courant de montée des coups consécutifs négatifs

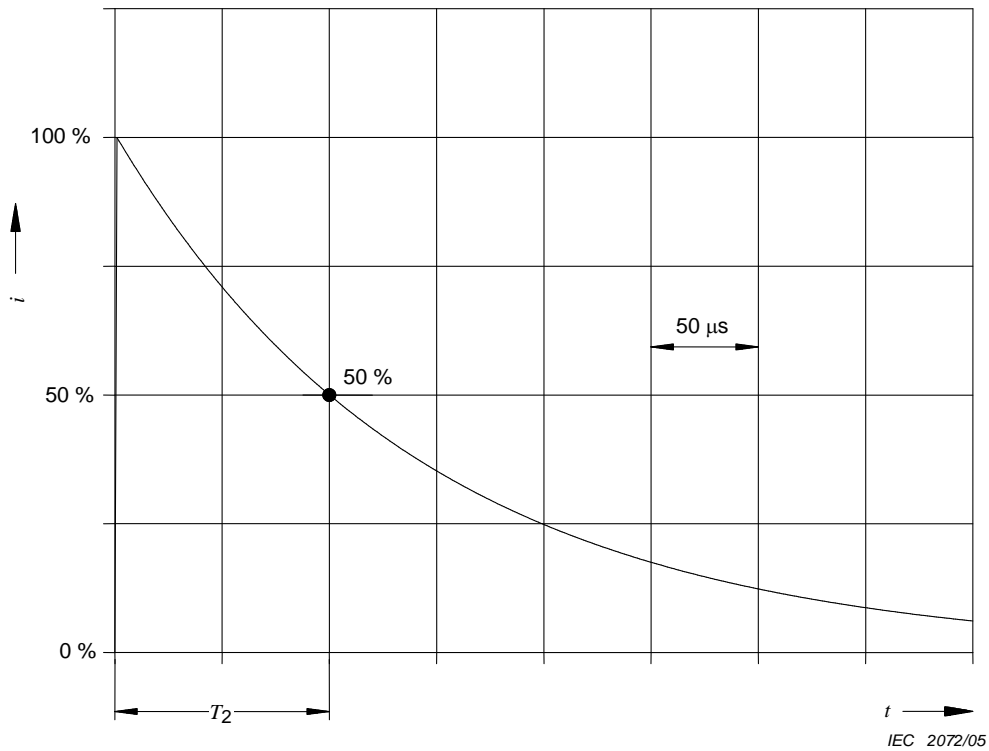


Figure B.6 – Forme d’onde du courant de queue des coups consécutifs négatifs

Un coup long peut être défini par une forme d'onde rectangulaire avec un courant moyen de  $I$  et une durée  $T_{\text{long}}$  donnée dans le Tableau 3.

A partir des courbes d'analyse en fonction du temps, les valeurs de densité du courant de foudre (Figure B.7) peuvent être dérivées.

Relevant frequency range for LEMP effects	Gamme de fréquences correspondant aux effets de l'IEMF
First negative stroke	Premier coup négatif
Amplitude density	Densité du courant
Subsequent negative stroke	Coup négatif consécutif
First positive stroke	Premier coup positif
Frequency	Fréquence

**Figure B.7 – Densité du courant de foudre pour le niveau de protection I**

## **Annexe C** (informative)

### **Simulation du courant de foudre aux fins d'essais**

#### **C.1 Généralités**

Si une structure est frappée par la foudre, le courant de foudre se répartit dans la structure. Lors des essais de mesures sur des éléments de protection individuelle, cela doit être pris en compte en choisissant les paramètres d'essai adaptés pour chaque élément. A cette fin, une analyse du système doit être effectuée.

#### **C.2 Simulation de l'énergie spécifique du premier coup de foudre de courte durée et de la charge du coup de foudre de longue durée**

Des paramètres d'essai sont définis aux Tableaux C.1 et C.2 et un exemple de générateur d'essai est représenté à la Figure C.1. Ce générateur peut être utilisé pour la simulation de l'énergie spécifique du premier coup court (positif) associé à la charge d'un coup long.

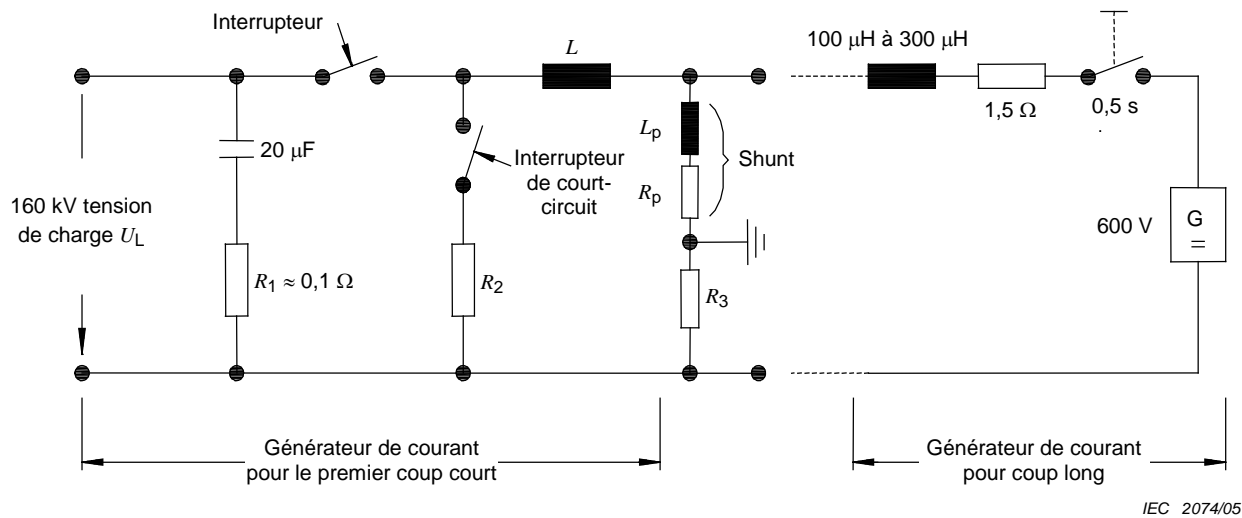
Ces essais peuvent permettre d'évaluer l'intégrité mécanique et l'absence d'échauffements indésirables et d'effets de fusion.

Les paramètres d'essai pour la simulation d'un premier coup court (courant crête  $I$ , énergie spécifique  $W/R$  et charge  $Q_{\text{short}}$ ) sont indiqués au Tableau C.1. Il convient d'obtenir ces paramètres avec le même coup court. Cela peut être réalisé par un courant décroissant de manière approximativement exponentielle avec  $T_2$  dans la plage des 350  $\mu\text{s}$ .

Les paramètres d'essai pour la simulation du coup long (charge  $Q_{\text{long}}$  et durée  $T_{\text{long}}$ ) sont indiqués au Tableau C.2.

Selon le type d'essai et les mécanismes des dommages prévus, les essais du premier coup court positif ou du coup long peuvent être effectués un par un ou de manière associée, où le coup de longue durée suit immédiatement le coup de foudre de courte durée. Il convient d'effectuer les essais de fusion à l'arc avec les deux polarités.

NOTE Le premier coup court négatif ne doit pas être utilisé pour les essais.



NOTE Les valeurs sont applicables à un niveau de protection I.

Figure C.1 – Exemple de générateur d’essai pour la simulation de l’énergie spécifique du premier coup de foudre de courte durée positif et pour la charge du coup de foudre de longue durée

Tableau C.1 – Paramètres d’essai du premier coup de foudre de courte durée positif

Paramètres d’essai	Niveau de protection			Tolérance %
	I	II	III – IV	
Courant crête <i>I</i> (kA)	200	150	100	± 10
Charge <i>Q</i> <sub>short</sub> (C)	100	75	50	± 20
Energie spécifique <i>W/R</i> (MJ/Ω)	10	5,6	2,5	± 35

Tableau C.2 – Paramètres d’essai d’un coup de foudre de longue durée

Paramètres d’essai	Niveau de protection			Tolérance %
	I	II	III – IV	
Charge <i>Q</i> <sub>long</sub> (C)	200	150	100	± 20
Durée <i>t</i> <sub>long</sub> (s)	0,5	0,5	0,5	± 10

C.3 Simulation de la raideur du courant de montée de coups courts

La raideur du courant détermine les tensions magnétiques induites dans les boucles mises en œuvre à proximité des conducteurs écoulant les courants de foudre.

La raideur du courant des coups courts est définie comme l’élévation du courant Δ*i* pendant le temps de montée Δ*t* (Figure C.2). Les paramètres d’essai pour la simulation de cette raideur du courant sont donnés dans le Tableau C.3. Des exemples de générateur d’essai sont donnés aux Figures C.3 et C.4, pouvant être utilisés pour la simulation de la raideur du front d’un courant de foudre associé à un coup de foudre direct. La simulation peut être effectuée pour un premier coup de foudre de courte durée positif et un coup de foudre de courte durée consécutif.

NOTE Cette simulation traite de la raideur du courant de montée de coups courts. La queue du courant n'a pas d'influence dans ce type de simulation.

La simulation conforme à l'Article C.3 peut être appliquée indépendamment ou combinée avec la simulation décrite à l'Article C.2.

Pour des informations complémentaires sur les paramètres d'essai simulant les effets de la foudre sur les composants d'un SPF, voir l'Annexe D.

Tableau C.3 – Paramètres d'essai de coups de foudre de courte durée

Paramètres d'essai	Niveau de protection			Tolérance %
	I	II	III – IV	
Premier coup court positif				
$\Delta i$ (kA)	200	150	100	$\pm 10$
$\Delta t$ ( $\mu$ s)	10	10	10	$\pm 20$
Coups consécutifs courts négatifs				
$\Delta i$ (kA)	50	37,5	25	$\pm 10$
$\Delta t$ ( $\mu$ s)	0,25	0,25	0,25	$\pm 20$

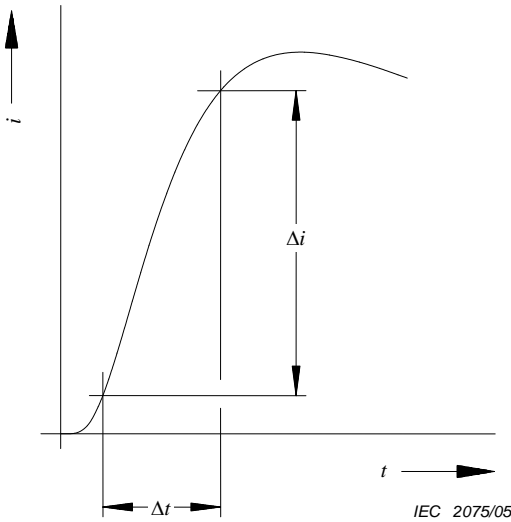
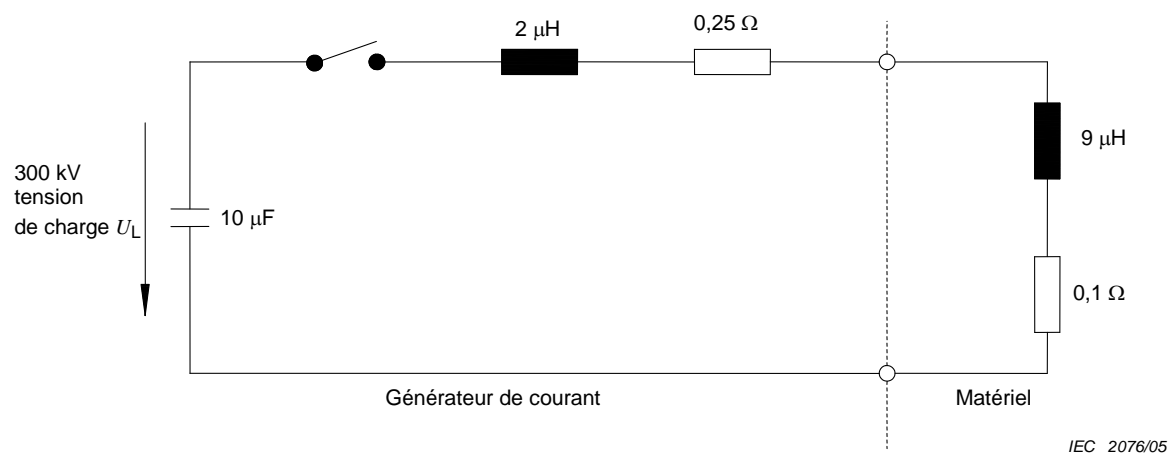
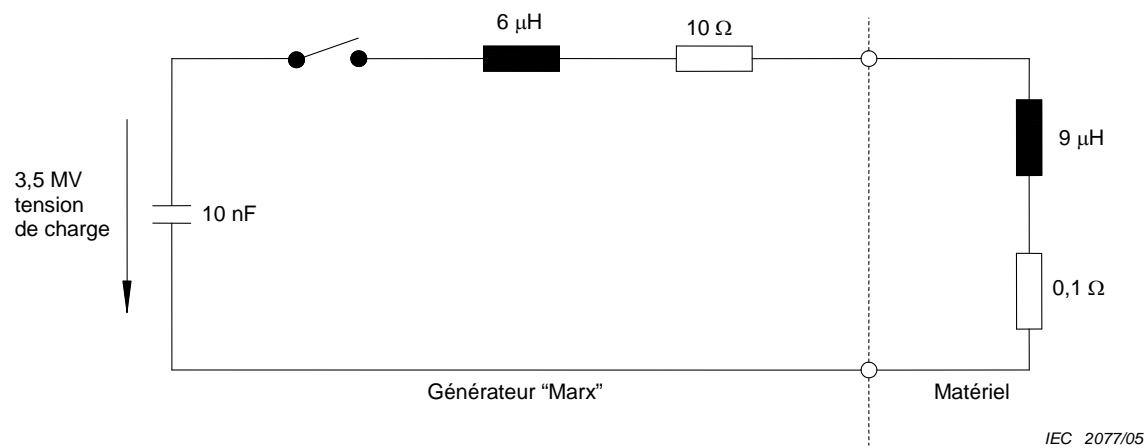


Figure C.2 – Définition de la raideur du courant conformément au Tableau C.3



NOTE Les valeurs sont applicables au niveau de protection I.

**Figure C.3 – Exemple de générateur d’essai pour la simulation de la raideur du front du premier coup de foudre court positif pour des appareils d’essai importants**



NOTE Les valeurs sont applicables au niveau de protection I.

**Figure C.4 – Exemple de générateur d’essai pour la simulation de la raideur du front des coups de foudre consécutifs courts négatifs pour des matériels importants**

## Annexe D (informative)

### Paramètres d'essai simulant les effets de la foudre sur les composants des systèmes de protection contre la foudre (SPF)

#### D.1 Généralités

La présente Annexe D donne les paramètres fondamentaux à utiliser dans les laboratoires pour simuler les effets de la foudre. Cette annexe traite de tous les composants d'un SPF soumis en tout ou en partie au courant de foudre et doit être utilisée en association avec les normes spécifiant les exigences et les essais pour chaque composant spécifique.

NOTE Les paramètres relatifs aux aspects des réseaux (par exemple coordination des parafoudres) ne sont pas traités dans la présente annexe.

#### D.2 Paramètres du courant relatifs au point d'impact

Les paramètres du courant de foudre jouant un rôle dans l'intégrité physique d'un système de protection contre la foudre sont généralement le courant crête  $I$ , la charge  $Q$ , l'énergie spécifique  $W/R$ , sa durée  $T$  et la raideur moyenne du courant  $di/dt$ . Chaque paramètre peut entraîner une défaillance différente comme analysé ci-dessous. Les paramètres du courant à considérer pour les essais sont des combinaisons de ces valeurs, choisies pour simuler en laboratoire le mécanisme de défaillance réel de la partie du SPF soumis à essai. Les critères de choix des valeurs représentatives sont donnés à l'Article D.5.

Le Tableau D.1 donne les valeurs maximales de  $I$ ,  $Q$ ,  $W/R$ ,  $T$  et  $di/dt$  à prendre en compte lors des essais, en fonction du niveau de protection requis.

**Tableau D.1 – Synthèse des paramètres de foudre à considérer pour le calcul des valeurs d'essai pour divers composants des SPF et pour divers niveaux de protection**

Composant	Aspects principaux	Paramètres de foudre					Notes
Dispositif de capture	Erosion au point de contact (par exemple revêtements métalliques fins)	NPF	$Q_{long}$ C	$T$			
		I	200	<1 s (pour $Q_{long}$ en un seul coup)			
		II	150				
		III-IV	100				
Dispositif de capture et conducteurs de descente	Echauffement ohmique	NPF	$W/R$ kJ/Ω	$T$			Le dimensionnement selon la CEI 62305-3 rend les essais caducs
		I	10 000	Pour $W/R$ en configuration adiabatique			
		II	5 600				
		III-IV	2 500				
	Effets mécaniques	NPF	$I$ kA	$W/R$ kJ/Ω			
		I	200	10 000			
		II	150	5 600			
		III-IV	100	2 500			
Composants de connexion	Effets combinés (thermiques,	NPF	$I$ kA	$W/R$ kJ/Ω	$T$		

	mécaniques et arcs)	I II III-IV	200 150 100	10 000 5 600 2 500	<2 ms (pour $I$ et $W/R$ en un seul choc)		
Prises de terre	Erosion au point de contact	NPF	$Q_{\text{long}}$ C	$T$			Dimensionnement généralement déterminé par les aspects mécaniques et chimiques (corrosion, etc.)
		I II III-IV	200 150 100	<1 s (pour $Q_{\text{long}}$ en un seul coup)			
Parafoudres avec éclateurs	Effets combinés (thermiques, mécaniques et arcs)	NPF	$I$ kA	$Q_{\text{short}}$ C	$W/R$ kJ/ $\Omega$	$di/dt$ kA/ $\mu$ s	Pour $I$ , $Q_{\text{short}}$ , et $W/R$ en un seul choc (durée $T < 2$ ms) ; avec $\Delta i/\Delta t$ en choc séparé
		I II III-IV	200 150 100	100 75 50	10 000 5 600 2 500	200 150 100	
Parafoudres incorporant des varistances à oxyde métallique	Effets énergétiques (surcharges)	NPF	$Q_{\text{short}}$ C				Les deux aspects doivent être contrôlés
		I II III-IV	100 75 50				
	Effets diélectriques (amorçages, craquelures)	NPF	$I$ kA	$T$			Des essais séparés peuvent être effectués
		I II III-IV	200 150 100	<2 ms (pour $I$ en un seul choc)			

### D.3 Partage du courant

Les paramètres donnés dans le Tableau D.3 sont relatifs au courant de foudre au point d'impact. En réalité, le courant s'écoule à la terre par plusieurs chemins, car plusieurs conducteurs de descente et conducteurs naturels existent normalement dans une installation extérieure de SPF et différents services pénètrent dans la structure à protéger (canalisations d'eau, de gaz, services de puissance et de communication, etc.). Pour la détermination des paramètres du courant s'écoulant dans des composants spécifiques du SPF, le partage du courant doit être pris en compte. De préférence, il convient d'estimer l'amplitude et la forme du courant à travers un composant en un emplacement spécifique du SPF. Si une estimation individuelle n'est pas possible, les paramètres du courant peuvent être estimés par les méthodes qui suivent.

Pour l'évaluation du partage du courant dans l'installation extérieure de SPF, le facteur de configuration  $k_c$  (voir l'Annexe C de la CEI 62305-3) peut être adopté. Ce facteur donne une estimation du partage du courant de foudre s'écoulant dans les conducteurs de descente de l'installation extérieure de SPF dans les conditions les plus défavorables.

Pour l'évaluation du partage du courant en présence d'éléments conducteurs extérieurs et de services de puissance et de communication connectés à la structure protégée, les valeurs approximatives de  $k_e$  et de  $k'_e$  données à l'Annexe E peuvent être adoptées.

L'approche décrite ci-dessus est applicable à l'évaluation de la valeur crête du courant s'écoulant dans un chemin particulier à la terre. Le calcul des autres paramètres du courant est réalisé comme suit :

$$I_p = k \cdot I \quad (\text{D.1})$$



$$Q_p = k \cdot Q \quad (D.2)$$

$$(W/R)_p = k^2 \cdot (W/R) \quad (D.3)$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_p = k \cdot \left(\frac{di}{dt}\right) \quad (D.4)$$

où

$x_p$  est la valeur de la grandeur considérée (courant crête  $I_p$ , charge  $Q_p$ , énergie spécifique  $(W/R)_p$ , raideur du courant  $(di/dt)_p$ ) applicable à un chemin particulier à la terre "p" ;

$x$  est la valeur de la grandeur considérée (courant crête  $I$ , charge  $Q$ , énergie spécifique  $(W/R)$ , raideur du courant  $(di/dt)$ ) applicable au courant de foudre total ;

$k$  est le facteur de partage du courant :

$k_c$  est le facteur de partage du courant pour un système de protection extérieur (voir l'Annexe C de la CEI 62305-3) ;

$k_e, k'_e$  sont les facteurs de partage du courant en présence d'éléments conducteurs extérieurs et de services de puissance et de communication pénétrant dans la structure protégée (voir Annexe E).

## D.4 Effets du courant de foudre entraînant des dommages éventuels

### D.4.1 Effets thermiques

Les effets thermiques associés au courant de foudre concernent un échauffement résistif dû à la circulation d'un courant électrique s'écoulant à travers la résistance d'un conducteur ou dans un système de protection contre la foudre (SPF) et à la chaleur générée à la racine des arcs au point de contact et dans toutes les parties isolées du SPF impliquées dans le développement d'un arc (par exemple éclateurs).

#### D.4.1.1 Echauffement résistif

Un échauffement résistif a lieu dans tout composant du SPF écoulant une partie significative du courant de foudre. La section minimale des conducteurs doit être suffisante pour empêcher tout échauffement anormal des conducteurs et un risque d'incendie pour l'environnement. En plus des aspects thermiques considérés en D.4.1, la tenue mécanique et les critères de tenue dans le temps doivent être pris en compte pour les parties exposées à des conditions atmosphériques et/ou à la corrosion. L'évaluation de l'échauffement d'un conducteur dû au passage du courant de foudre est parfois nécessaire si des risques de blessure, d'incendie ou d'explosion existent.

Des lignes directrices sont données ci-après pour évaluer l'élévation de température des conducteurs soumis au passage d'un courant de foudre.

Une approche analytique est présentée comme suit :

La puissance instantanée dissipée en chaleur dans un conducteur en raison du passage d'un courant électrique est donnée par :

$$P(t) = i^2 \cdot R \quad (D.5)$$

L'énergie thermique générée par le choc de foudre total est donc égale au produit de la résistance ohmique du chemin de foudre dans le composant du SPF considéré multiplié par l'énergie spécifique du choc et est exprimée en Joules (J) ou Watt/seconde (W.s).

$$W = R \cdot \int i^2 \cdot dt \quad (D.6)$$

Lors d'une décharge de foudre, les phases à énergie spécifique très élevée de l'éclair sont de durée trop faible pour un échauffement significatif de la structure, le phénomène est donc considéré comme adiabatique.

La température des conducteurs du SPF peut être évaluée comme suit :

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \frac{\frac{W}{R} \cdot \alpha \cdot \rho_0}{q^2 \cdot \gamma \cdot C_w} - 1 \right] \quad (D.7)$$

où

$\theta - \theta_0$  est l'élévation de température des conducteurs (K) ;

$\alpha$  est le coefficient de température de la résistance (1/K) ;

$W/R$  est l'énergie spécifique du courant de choc (J/Ω) ;

$\rho_0$  est la résistance ohmique spécifique du conducteur à la température ambiante (Ωm) ;

$q$  est la section du conducteur (m<sup>2</sup>) ;

$\gamma$  est la densité du matériau (kg/m<sup>3</sup>) ;

$C_w$  est la capacité thermique (J/kgK) ;

$\theta_s$  est la température de fusion (°C).

Les valeurs caractéristiques des paramètres physiques de l'Equation (D.7), pour divers matériaux utilisés dans les SPF, sont indiquées dans le Tableau D.2. Le Tableau D.3 indique, comme exemple d'application de cette équation, l'élévation de température des conducteurs en divers matériaux en fonction de  $W/R$  et de la section du conducteur.

La forme typique d'un coup de foudre est caractérisée par une durée courte (temps jusqu'à mi-valeur de quelques 100 μs) et un courant crête élevé. Dans ces conditions, il convient de prendre aussi en compte l'effet de peau. Toutefois, dans la plupart des cas pratiques intéressant les composants du SPF, les caractéristiques des matériaux (perméabilité magnétique dynamique des conducteurs du SPF) et les configurations géométriques (section des conducteurs du SPF) réduisent la contribution de l'effet de peau à l'élévation de température des conducteurs à des niveaux négligeables.

La composante du coup de foudre qui intéresse essentiellement le mécanisme d'échauffement est le premier retour.

**Tableau D.2 – Caractéristiques physiques de matériaux typiques utilisés dans les composants des SPF**

Caractéristique	Matériau			
	Aluminium	Acier doux	Cuivre	Acier inoxydable*
$\rho_0$ (Ωm)	29 10 <sup>-9</sup>	120 10 <sup>-9</sup>	17,8 10 <sup>-9</sup>	0,7 10 <sup>-6</sup>
$\alpha$ (1/K)	4,0 10 <sup>-3</sup>	6,5 10 <sup>-3</sup>	3,92 10 <sup>-3</sup>	0,8 10 <sup>-3</sup>
$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	2 700	7 700	8 920	8 000
$\theta_s$ (°C)	658	1 530	1 080	1 500
$C_s$ (J/kg)	397 10 <sup>3</sup>	272 10 <sup>3</sup>	209 10 <sup>3</sup>	–
$C_w$ (J/kgK)	908	469	385	500
* Austénitique non magnétique.				

**Tableau D.3 – Elévation de température de conducteurs de diverses sections en fonction de  $W/R$** 

Section mm <sup>2</sup>	Matériau											
	Aluminium			Acier doux			Cuivre			Acier inoxydable*		
	$W/R$ MJ/Ω			$W/R$ MJ/Ω			$W/R$ MJ/Ω			$W/R$ MJ/Ω		
	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10
4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	564	–	–	–	–	–	169	542	–	–	–	–
16	146	454	–	1120	–	–	56	143	309	–	–	–
25	52	132	283	211	913	–	22	51	98	940	–	–
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190

\* Austénitique non magnétique.

**D.4.1.2 Dommage thermique au point de contact**

Des dommages thermiques au point de contact peuvent être observés sur tous les composants des SPF où un arc peut se développer, c'est-à-dire dispositifs de capture, éclateurs, etc.

La fusion et l'érosion des matériaux peuvent se produire au point de contact. En réalité, à la racine de l'arc, il existe une entrée thermique importante depuis la racine de l'arc et une concentration d'échauffement ohmique en raison de densités élevées de courant. L'essentiel de l'énergie thermique est généré à la surface ou très près du matériau. La chaleur générée à proximité de la racine est en excès par rapport à celle pouvant être absorbée par conduction par le matériau; cet excès entraîne soit la fusion ou la vaporisation du matériau. La sévérité du phénomène dépend de l'amplitude du courant et de sa durée.

**D.4.1.2.1 Généralités**

Plusieurs modèles théoriques de calcul des effets thermiques en ce point de contact du canal de foudre sur des surfaces métalliques ont été élaborés. Pour des raisons de simplicité, la présente norme ne traitera que du modèle de la chute de tension anode-ou-cathode. L'application de ce modèle est particulièrement efficace pour des épaisseurs métalliques faibles ; dans tous les cas, il donne des résultats sûrs car il suppose que toute l'énergie injectée au point de contact est utilisée pour la fusion ou la vaporisation du matériau conducteur, en négligeant les transferts dynamiques de chaleur dans le métal. D'autres modèles introduisent la dépendance entre les dommages au point de contact de la foudre et la durée du courant de choc.

**D.4.1.2.2 Modèle de la chute de tension anode-ou-cathode**

L'énergie d'entrée  $W$  à la racine de l'arc est supposée égale à la chute de tension anode/cathode  $u_{a,c}$  multipliée par la charge  $Q$  du courant de foudre :

$$W = \int u_{a,c} \, idt = u_{a,c} \int idt = u_{a,c} \cdot Q \quad (\text{D.8})$$

Comme  $u_{a,c}$  est considérée comme constante pour les valeurs du courant, la charge du courant de foudre,  $Q$ , est essentiellement la cause de la conversion d'énergie dans la racine de l'arc.

La chute de tension anode-ou-cathode,  $u_{a,c}$  présente une valeur de quelques dizaines de volts.

Une méthode simplifiée suppose que toute l'énergie développée dans la racine de l'arc n'est utilisée que pour la fusion du matériau. L'équation (D.9) utilise cette hypothèse mais donne lieu à une surestimation du volume de métal fondu

$$V = \frac{u_{a,c}}{\gamma} \cdot \frac{Q}{C_w (\theta_s - \theta_u) + c_s} \quad (D.9)$$

où

- $V$  est le volume de métal fondu (m<sup>3</sup>) ;
- $u_{a,c}$  est la chute de tension anode-ou-cathode (supposée constante) (V) ;
- $Q$  est la charge du courant de foudre (C) ;
- $\gamma$  est la densité du matériau (kg/m<sup>3</sup>) ;
- $C_w$  est la capacité thermique (J/kgK) ;
- $\theta_s$  est la température de fusion (°C) ;
- $\theta_u$  est la température ambiante (°C) ;
- $C_s$  est la chaleur spécifique de fusion (J/kg).

Les valeurs caractéristiques des paramètres physiques de cette équation, pour divers matériaux utilisés dans les SPF, sont indiquées dans le Tableau D.2.

En fait, la charge à considérer est la somme des charges du coup en retour et du courant de suite de foudre. De nombreuses années d'expérience de laboratoire ont montré que les effets de la charge du coup en retour sont mineurs par rapport à ceux du courant de suite.

#### D.4.2 Effets mécaniques

Les effets mécaniques liés au courant de foudre dépendent de l'amplitude et de la durée du courant, ainsi que des caractéristiques élastiques de la structure mécanique affectée. Les effets mécaniques dépendent aussi des forces de frottement (friction) agissant entre les parties éventuellement en contact avec les SPF.

##### D.4.2.1 Interaction magnétique

Des forces magnétiques apparaissent entre deux conducteurs indépendants parcourus par un courant ou lorsqu'il n'existe qu'un seul conducteur, forme un coin ou une boucle.

Lorsqu'un courant parcourt un circuit, l'amplitude des forces électrodynamiques dans les divers points du circuit est fonction de l'amplitude du courant de foudre et de la configuration géométrique du circuit. L'effet mécanique de ces forces est fonction, non seulement de leur amplitude, mais aussi de la forme générale du courant, de sa durée et de la configuration géométrique de l'installation.

##### D.4.2.1.1 Forces électrodynamiques

Les forces électrodynamiques dues au courant,  $i$ , s'écoulant dans un conducteur présentant deux branches parallèles de longueur  $l$  et à une distance  $d$  (boucle longue et étroite), voir Figure D.1, peuvent être approximativement calculées par l'équation suivante :

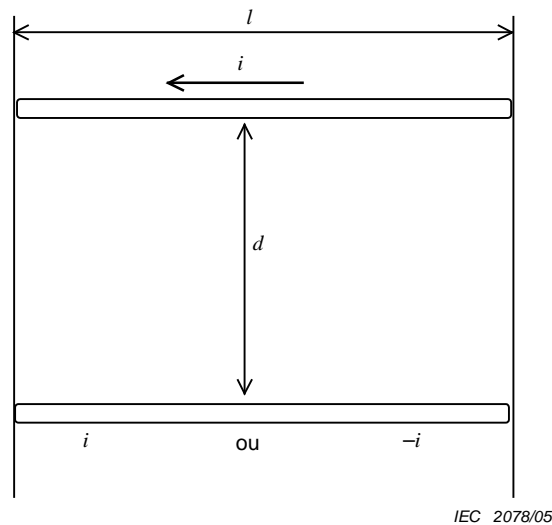
$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i^2(t) \cdot \frac{l}{d} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i^2(t) \cdot \frac{l}{d} \quad (D.10)$$

où

- $F(t)$  est la force électrodynamique (N) ;
- $i$  est le courant (A) ;
- $\mu_0$  est la perméabilité magnétique dans l'espace (vide) ( $4\pi 10^{-7}$  H/m) ;

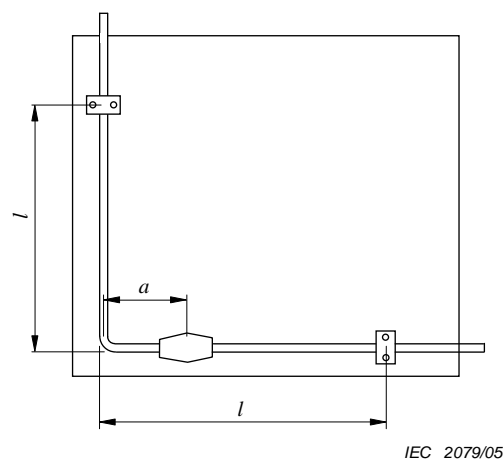
$l$  est la longueur des conducteurs (m) ;

$d$  est la distance entre les branches parallèles du conducteur (m).

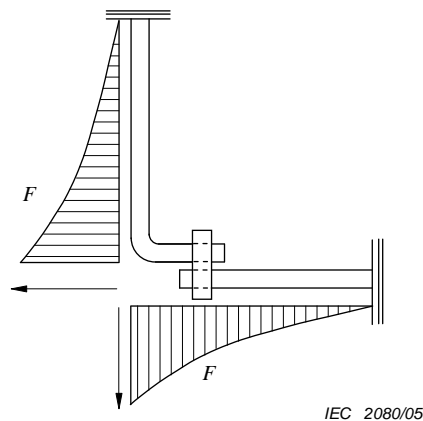


**Figure D.1 – Disposition générale de deux conducteurs pour le calcul des forces électrodynamiques**

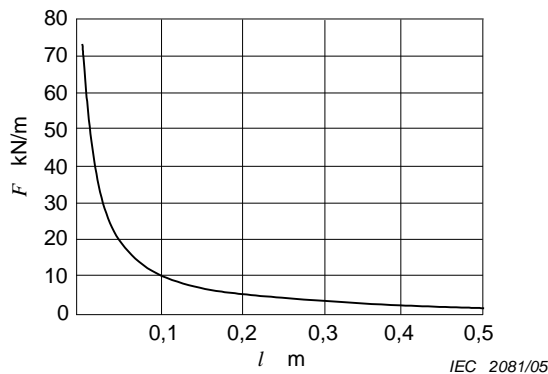
Un exemple typique de protection est donné par une disposition symétrique en coin de conducteurs, formant un angle de 90°, avec une fixation à proximité du coin comme présenté à la Figure D.2. Le diagramme des contraintes pour cette configuration est montré à la Figure D.3. La force axiale sur le conducteur horizontal tend à arracher le conducteur de sa fixation. La valeur numérique de la force le long d'un conducteur horizontal, pour une valeur crête de courant de 100 kA et une longueur du conducteur vertical de 0,5 m est indiquée à la Figure D.4.



**Figure D.2 – Disposition typique des conducteurs dans un SPF**



**Figure D.3 – Diagramme des contraintes pour la configuration de la Figure D.2**



NOTE Valeur du courant crête de 100 kA et longueur du conducteur vertical de 0,5 m.

**Figure D.4 – Force par unité de longueur le long du conducteur horizontal de la Figure D.2**

#### D.4.2.1.2 Effets des forces électrodynamiques

En termes d'amplitude des forces appliquées, la valeur instantanée de la force électrodynamique  $F(t)$  est proportionnelle au carré du courant instantané  $I(t)^2$ . En termes de contrainte dans la structure mécanique du SPF, exprimée par le produit de la déformation élastique  $\delta(t)$  et de la constante d'élasticité  $k$  de la structure du SPF, il convient de considérer deux effets. La fréquence naturelle mécanique (liée à la tenue élastique de la structure du SPF) et la déformation permanente de la structure du SPF (liée à la tenue plastique) sont les paramètres les plus importants. De plus, dans de nombreux cas, l'effet des forces de frottement dans la structure a aussi une importance significative.

L'amplitude des vibrations de la structure élastique du SPF due aux forces électrodynamiques développées par le courant de foudre peut être calculée au moyen d'équations différentielles du deuxième degré; le facteur essentiel est le rapport entre la durée du courant de choc et la période de l'oscillation mécanique naturelle de la structure du SPF. La condition typique rencontrée pour les SPF est une période naturelle d'oscillation de la structure beaucoup plus élevée que celle de la force appliquée (la durée du courant de foudre). Dans ce cas, la contrainte mécanique maximale apparaît après l'arrêt du courant de choc et présente une valeur crête restant inférieure à la force appliquée, et peut ainsi être négligée dans la plupart des cas.

Les déformations plastiques apparaissent lorsque la contrainte en traction est supérieure à la limite élastique du matériau. Si le matériau de la structure du SPF est doux, tel qu'aluminium

ou cuivre recuit, les forces électrodynamiques peuvent déformer les conducteurs en coin ou en boucle. Il convient que les composants des SPF soient toutefois conçus pour résister à ces forces et présenter essentiellement une tenue élastique.

La contrainte totale mécanique appliquée à la structure du SPF dépend de l'intégrale de temps des forces appliquées, et par suite de l'énergie spécifique associée au courant de choc. Elle dépend également de la forme du courant de choc et de sa durée (comparée à la période d'oscillation naturelle de la structure). Tous ces paramètres significatifs doivent donc être pris en compte lors des essais.

#### **D.4.2.2 Dommages dus à l'onde de choc acoustique**

Lorsqu'un courant de foudre s'écoule à travers un arc, une onde de choc est produite. La sévérité du choc est fonction de la valeur crête du courant et de son taux de montée.

En général, les dommages dus à l'onde de choc acoustique sont insignifiants sur les parties métalliques du SPF, mais peuvent agir sur les composants environnants.

#### **D.4.3 Effets combinés**

En pratique, les effets thermiques et mécaniques apparaissent simultanément. Si l'échauffement des matériaux des composants (tiges, fixations, etc.) est suffisant pour ramollir les matériaux, des dommages plus importants que ceux dus aux seules forces peuvent apparaître. Dans le cas extrême où le conducteur peut fondre et exploser, cela entraîne des dommages considérables pour la structure environnante. Si la section du matériau est suffisante pour supporter de manière sûre ces phénomènes, seule l'intégrité mécanique doit être vérifiée.

#### **D.4.4 Etincelles**

En général, les étincelles ne deviennent importantes qu'en présence d'environnements inflammables ou de matériaux inflammables. Pour les composants des SPF, dans la pratique, l'étincelage n'est pas important.

Deux types d'étincelles peuvent apparaître, c'est-à-dire étincelle thermique et étincelle en tension. Des étincelles thermiques surviennent lorsqu'un très fort courant est contraint de traverser un joint entre deux matériaux conducteurs. La plupart des étincelles thermiques apparaissent sur les bords, à l'intérieur du joint si la pression de l'interface est trop faible ; la cause primaire en est une densité de courant élevée et une pression de l'interface inadaptée. L'intensité des étincelles thermiques est fonction de l'énergie spécifique et, pour cette raison, la phase critique du coup de foudre est le premier coup en retour. Les étincelles en tension apparaissent lorsque le courant est obligé de prendre des chemins de contournement, par exemple dans un joint, et si la tension induite dans une telle boucle dépasse la tension de claquage entre les parties métalliques. La tension induite est proportionnelle à l'inductance propre multipliée par la raideur du courant de foudre. La composante la plus critique de la foudre pour les étincelles en tension est donc le coup consécutif négatif.

### **D.5 Composants des SPF, problèmes afférents et paramètres d'essai**

Les SPF sont constitués de composants en divers matériaux, chacun ayant une fonction spécifique dans le système. La nature des composants et les contraintes spécifiques auxquelles ils sont soumis nécessitent une étude particulière lors de l'élaboration d'essais en laboratoire pour vérifier leurs performances.

#### **D.5.1 Dispositif de capture**

Les effets des contraintes sur les dispositifs de capture dus à la foudre sont liés aux effets mécaniques et thermiques (comme examiné en D.5.2 ci-après en considérant qu'un fort pourcentage du courant de foudre s'écoulera dans le dispositif concerné), et parfois aux

effets d'érosion dus à un arc, particulièrement dans des composants naturels de SPF comme des couvertures fines métalliques de toitures (où des percements et des élévations excessives de température de surface peuvent apparaître) et aux dispositifs suspendus.

Pour les effets d'érosion dus à un arc, il convient de prendre en compte deux paramètres d'essai essentiels, c'est-à-dire la charge du courant de choc de longue durée et sa durée.

La charge définit l'entrée d'énergie à la racine de l'arc. En particulier, l'apport des coups de courte durée peut être négligé si des coups de longue durée semblent plus sévères pour ce composant.

La durée du courant présente un rôle important dans le phénomène de transfert de chaleur dans le matériau. La durée des courants lors des essais doit être comparable à celle des coups de longue durée (0,5 s à 1 s).

### **D.5.2 Conducteurs de descente**

Les contraintes exercées sur les conducteurs de descente par la foudre peuvent être divisées en deux grandes catégories :

- les contraintes thermiques dues à l'échauffement résistif ;
- les contraintes mécaniques liées à l'interaction magnétique dans les cas où le courant de foudre se partage dans des conducteurs proches les uns des autres ou lorsque le courant change de direction (courbes ou connexions entre conducteurs présentant un angle donné).

Dans la plupart des cas, ces deux effets agissent indépendamment l'un de l'autre et des essais séparés en laboratoire peuvent être effectués pour vérifier chacun de ces effets. Cette approche peut être adoptée dans les cas où la chaleur dissipée par le passage du courant de foudre ne modifie pas de manière substantielle les caractéristiques mécaniques.

#### **D.5.2.1 Echauffement résistif**

Les calculs et les mesures de l'échauffement de conducteurs de diverses sections et en divers matériaux dû au passage du courant de foudre circulant le long des conducteurs ont été publiés par plusieurs auteurs. Les principaux résultats sont indiqués en D.4.1.1 sous forme de graphiques et de formules. Aucun essai en laboratoire n'est donc généralement nécessaire pour vérifier la tenue d'un conducteur à l'élévation de température.

Pour tous les cas où un essai en laboratoire est prescrit, les considérations suivantes doivent être prises en compte.

Les principaux paramètres d'essai à prendre en compte sont l'énergie spécifique et la durée du courant de choc.

L'énergie spécifique définit l'élévation de température due à l'échauffement Joule dû au passage du courant de foudre. Les valeurs numériques à prendre en compte sont celles relatives au premier choc. Des données conservatoires sont obtenues en prenant en compte les coups positifs.

La durée du courant de choc a une influence décisive sur le processus d'échange de chaleur en fonction de l'environnement ambiant du conducteur considéré. Dans la plupart des cas, la durée du courant de choc est si faible que le phénomène d'échauffement peut être considéré comme adiabatique.



### D.5.2.2 Effets mécaniques

Comme déjà examiné en D.4.2.1, les interactions mécaniques se développent entre des conducteurs parcourus par le courant de foudre. La force est proportionnelle au produit des courants s'écoulant dans les conducteurs (ou au carré du courant si une simple courbure est considérée) et est proportionnelle à l'inverse de la distance entre les conducteurs.

La situation typique pour laquelle un effet visible peut exister est celle où un conducteur forme une boucle ou un coin à angle droit. Quand un tel conducteur doit écouler le courant de foudre, il est soumis à une force mécanique qui tend à élargir la boucle et à redresser le coin et cela entraîne une courbure inverse. La valeur de cette force est proportionnelle au carré du courant. Toutefois, il convient qu'une distinction nette soit faite entre les forces électrodynamiques proportionnelles au carré du courant et les contraintes correspondantes fonction des caractéristiques élastiques de la structure mécanique du SPF. Pour des structures de SPF présentant des fréquences naturelles faibles, la contrainte dans la structure du SPF sera nettement inférieure à la force électrodynamique. Dans ce cas, aucun essai en laboratoire n'est généralement nécessaire pour vérifier la tenue d'une courbure ou de coin à angle droit d'un conducteur sur le plan mécanique, si les sections des exigences de la présente norme sont satisfaites.

Si un essai en laboratoire est prescrit (particulièrement pour les matériaux doux), les considérations suivantes doivent être prises en compte. Trois paramètres relatifs au premier coup en retour doivent être pris en compte : la durée, l'énergie spécifique du courant de choc et, dans le cas de systèmes rigides, l'amplitude du courant.

La durée du courant de choc, comparée à la période d'oscillation mécanique naturelle de la structure du SPF, définit le type de réponse mécanique du système pour le déplacement :

- Si la durée du choc est beaucoup plus courte que la période d'oscillation mécanique naturelle de la structure du SPF (cas normal pour des SPF subissant des contraintes de coup de foudre), la masse et l'élasticité du système l'empêchent de se déplacer de manière appréciable et la contrainte mécanique est essentiellement liée à l'énergie spécifique du courant de choc. La valeur crête du courant de choc a un effet limité.
- Si la durée du choc est comparable ou plus élevée que la période d'oscillation mécanique naturelle de la structure, le déplacement du système est plus sensible à la forme d'onde de la contrainte appliquée. Dans ce cas, la valeur crête du courant de choc et son énergie spécifique doivent être reproduites lors des essais.

L'énergie spécifique du courant de choc définit la contrainte entraînant les déformations élastiques et plastiques de la structure du SPF. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup.

Les valeurs maximales du courant de choc définissent la longueur du déplacement maximal de la structure du SPF, en cas de systèmes rigides avec des fréquences d'oscillations naturelles élevées. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup.

### D.5.3 Composants de connexion

Les composants de connexion entre les conducteurs adjacents d'un SPF représentent des points possibles de défauts du système de protection, tant au point de vue mécanique que thermique lors de très grandes contraintes.

Si un connecteur est placé d'une manière telle que le conducteur suit un angle droit, les effets principaux des contraintes sont liés aux forces mécaniques qui tendent à raidir la fixation du conducteur et à contraindre la connexion en raison des forces de frottement résistantes entre le composant de connexion et les conducteurs. Le développement d'arcs aux points de contact des différentes parties est possible. De plus, l'échauffement dû à la concentration de courant sur de petites surfaces a un effet non négligeable.

Les essais en laboratoire ont montré qu'il est difficile de séparer chaque effet les uns des autres car une synergie complexe s'établit. La contrainte mécanique est affectée par une fonte locale de la zone de contact. Des déplacements relatifs entre des parties du composant de connexion entraînent le développement d'arcs et consécutivement, une génération intense de chaleur.

En l'absence de modèle applicable, il convient que les essais en laboratoire soient menés de manière à simuler d'aussi près que possible les paramètres concernés du courant de foudre dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire les paramètres du courant de foudre doivent être appliqués au moyen d'une seule contrainte électrique.

Dans ce cas, trois paramètres doivent être pris en compte : la valeur crête, l'énergie spécifique et la durée du courant de choc.

Les valeurs maximales du courant de choc déterminent la force maximale, ou, si pendant ou après la force de traction électrodynamique dépasse la force de frottement, la longueur du déplacement maximal de la structure du SPF. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup. Des données conservatoires sont obtenues à partir des coups positifs.

L'énergie spécifique du courant de choc détermine l'échauffement sur les surfaces de contact lorsque le courant se concentre sur de petites surfaces. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup. Des données conservatoires sont obtenues à partir des coups positifs.

La durée du courant de choc détermine le déplacement maximal de la structure, après dépassement des forces de frottement et a un rôle important dans le phénomène de transfert de chaleur dans le matériau.

#### **D.5.4 Prises de terre**

Les vrais problèmes concernant les électrodes de prise de terre sont liés à la corrosion chimique et aux dommages mécaniques dus aux forces autres qu'électrodynamiques. En pratique, les érosions des extrémités des composants à la racine de l'arc dans le sol présentent une importance mineure. Il est toutefois supposé, contrairement aux dispositifs de capture, qu'un système de protection contre la foudre a plusieurs prises de terre. Ainsi, le courant de foudre est partagé entre plusieurs électrodes et entraîne moins d'effets à la racine de l'arc.

Deux paramètres principaux doivent être considérés dans ce cas : la charge d'un courant de choc de longue durée et sa durée.

La charge détermine l'entrée d'énergie à la racine de l'arc. En particulier, l'apport du premier coup peut être négligé si des coups de longue durée semblent plus sévères pour ce composant.

La durée du courant de choc présente un rôle important dans le phénomène de transfert de chaleur dans le matériau. La durée des courants de choc lors des essais doit être comparable à celle des coups de longue durée (0,5 s à 1 s).

#### **D.6 Parafoudres**

Les effets des contraintes dues à la foudre sur les parafoudres sont fonction du type de parafoudre avec la référence particulière qu'ils comportent ou non des éclateurs.

### D.6.1 Parafoudres avec éclateurs

Les contraintes exercées par la foudre sur des éclateurs peuvent être classées en deux grandes catégories :

- l'érosion des électrodes des éclateurs par échauffement, fusion ou vaporisation du matériau ;
- les contraintes mécaniques dues à l'onde de choc de décharge.

Il est très difficile de séparer ces effets car ils sont tous deux liés aux principaux paramètres du courant de foudre par des fonctions complexes.

Pour les éclateurs, les essais en laboratoire doivent être effectués de manière que les paramètres mis en jeu soient aussi proches que ceux du courant de foudre à l'instant critique, c'est-à-dire que tous les paramètres du courant de foudre doivent être obtenus à partir d'une seule contrainte électrique.

Cinq paramètres doivent être pris en compte dans ce cas : la valeur crête, la charge du courant de choc, sa durée, son énergie spécifique et son taux de montée.

La valeur crête du courant détermine la sévérité de l'onde de choc. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup. Des données conservatoires sont obtenues à partir des coups positifs.

La charge détermine l'entrée d'énergie dans l'arc. Cette énergie chauffe, fusionne et enfin vaporise en partie le matériau de l'électrode au point de contact de l'arc. Les valeurs numériques à prendre en compte sont celles relatives à l'éclair complet. Toutefois, la charge du courant de longue durée peut être négligée dans de nombreux cas selon le schéma des réseaux d'alimentation (TT, TN ou IT).

La durée du courant de choc présente un rôle important dans le phénomène de transfert de chaleur dans le matériau de l'électrode et la propagation consécutive du front de fusion.

L'énergie spécifique du courant de choc détermine la contrainte entraînant la compression auto-magnétique de l'arc et la physique des jets de plasma de l'électrode générés à l'interface de la surface de l'électrode et de l'arc, pouvant vaporiser une partie significative du matériau fondu. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup. Des données conservatoires sont obtenues à partir des coups positifs.

NOTE Pour les éclateurs utilisés sur les réseaux d'alimentation, la fréquence éventuelle du courant de suite constitue une contrainte importante qu'il faut prendre en compte.

### D.6.2 Parafoudres avec des varistances à oxyde métallique

Les contraintes exercées sur de tels parafoudres par la foudre peuvent être divisées en deux catégories principales : les surcharges et les claquages. Chaque catégorie est définie par son mode de défaillance due à divers phénomènes définis par différents paramètres. La défaillance d'une varistance à oxyde métallique est liée à sa caractéristique la plus faible et ainsi, il est improbable qu'une synergie entre plusieurs contraintes fatales puisse se produire. C'est pourquoi il est admis d'effectuer des essais séparés pour vérifier la tenue pour tout mode de défaillance.

Les surcharges sont dues à la quantité d'énergie absorbée dépassant les capacités du dispositif. Cette énergie en excès peut être liée à la contrainte de foudre elle-même. Toutefois il est considéré que pour les parafoudres connectés sur les réseaux d'alimentation, le courant de suite injecté dans le dispositif par la source de puissance immédiatement après l'arrêt de l'écoulement du courant de foudre peut jouer un rôle important dans la destruction des parafoudres. Enfin, un parafoudre peut être définitivement endommagé par une tension appliquée liée à un coefficient de température négatif des caractéristiques volt/ampère des résistances. Pour la simulation de surcharge des varistances à oxyde métallique, un des principaux paramètres à prendre en compte est la charge.

La charge détermine l'énergie à l'entrée de la varistance, en admettant comme constante la tension résiduelle de cette varistance. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au coup de foudre.

Le claquage et les craquelures sont dus à l'amplitude des courants de choc dépassant les capacités des résistances. Le mode de défaillance est généralement mis en évidence par un claquage extérieur le long du collier, pénétrant parfois dans le bloc entraînant une craquelure ou un trou perpendiculaire au collier. La défaillance est principalement liée à un défaut diélectrique du collier du bloc de résistances.

Deux paramètres principaux doivent être considérés pour la simulation du phénomène de foudre : la valeur maximale et la durée du courant de choc.

La valeur maximale du courant de choc définit, par le niveau de tension résiduelle correspondant, que la tenue diélectrique maximale du collier est dépassée. Les valeurs numériques à considérer sont celles relatives au premier coup. Des valeurs conservatoires sont obtenues à partir des coups positifs.

La durée des courants de choc détermine la durée de l'application de la contrainte diélectrique sur le collier de la résistance.

#### **D.7 Synthèse des paramètres d'essai à retenir lors des essais des composants des SPF**

Le Tableau D.1 synthétise les aspects les plus critiques de chaque composant des SPF lors de son fonctionnement et les paramètres du courant de foudre à reproduire en laboratoire.

Les valeurs numériques du Tableau D.1 sont relatives aux paramètres de foudre importants au point d'impact.

Les valeurs d'essai doivent être calculées en considérant le partage du courant pouvant s'exprimer en fonction du facteur de partage du courant pour la configuration considérée, comme expliqué à l'Article D.3.

Les valeurs numériques des paramètres à utiliser lors des essais peuvent donc être calculées selon les données du Tableau D.1, en appliquant les facteurs de réduction liés au partage du courant, comme exprimé par la formule indiquée à l'Article D.3.

## Annexe E (informative)

### Chocs dus à la foudre en divers points de l'installation

#### Vue d'ensemble

Pour le dimensionnement des conducteurs, des parafoudres et des matériels, il convient de déterminer la menace due aux chocs aux points d'installation de ces composants. Les chocs peuvent être dus à des courants partiels de foudre ou à des effets d'induction dans des boucles de l'installation. Il faut que la menace due à ces chocs soit inférieure à la tenue aux chocs des composants utilisés définie par des essais appropriés, si nécessaire.

#### E.1 Chocs dus à des impacts sur la structure (source de dommage S1)

##### E.1.1 Ecoulement dans les éléments conducteurs extérieurs et les services connectés à la structure

Lorsque le courant de foudre s'écoule à la terre, il se divise entre les diverses prises de terre, les éléments conducteurs extérieurs et les réseaux pénétrant dans la structure directement ou par des parafoudres.

$$\text{Si} \quad I_t = k_e \cdot I \quad (\text{E.1})$$

est la partie du courant de foudre s'écoulant dans un élément conducteur ou service extérieur, dans ce cas le facteur de partage du courant  $k_e$  est fonction :

- du nombre de chemins parallèles ;
- de leur résistance conventionnelle de terre pour les parties enterrées, ainsi que pour les parties aériennes ou mixtes mises à la terre ;
- de la résistance conventionnelle de terre des prises de terre.

$$\bullet \quad \text{pour les installations enterrées} \quad k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z(n_1 + n_2 \frac{Z_1}{Z_2})} \quad (\text{E.2})$$

$$\bullet \quad \text{pour les installations aériennes} \quad k_e = \frac{Z}{Z_2 + Z(n_2 + n_1 \frac{Z_2}{Z_1})} \quad (\text{E.3})$$

où

$Z$  est la résistance conventionnelle de terre du réseau des prises de terre ;

$Z_1$  est la résistance conventionnelle de terre des éléments conducteurs extérieurs ou des lignes souterraines (Tableau E.1) ;

$Z_2$  est la résistance conventionnelle de terre des éléments conducteurs aériens. Si la résistance de mise à la terre d'un point est inconnue, la valeur de  $Z_1$  (voir Tableau E.1) peut être utilisée en l'associant à la résistivité du sol au point considéré.

NOTE 1 Cette valeur prise dans les formules ci-dessus est la même pour chaque mise à la terre. Si cela n'est pas le cas, des équations plus complexes peuvent être utilisées.

$n_1$  est le nombre total des éléments conducteurs extérieurs ou lignes extérieures enterrées ;

$n_2$  est le nombre total des éléments conducteurs extérieurs ou lignes extérieures aériennes ;

$I$  est le courant de foudre correspondant au niveau de protection choisi.

En supposant en première approximation que la moitié du courant de foudre s'écoule à la terre et que  $Z_2 = Z_1$ , la valeur de  $k_e$  peut être évaluée pour un élément conducteur extérieur ou ligne par :

$$k_e = 0,5 / (n_1 + n_2) \quad (\text{E.4})$$

Si les lignes souterraines (par exemple, les réseaux de puissance et de communication) ne sont ni écrantées, ni disposées dans des conduits métalliques, chaque conducteur  $n'$  écoule une partie du courant de foudre égale à

$$k'_e = k_e / n' \quad (\text{E.5})$$

$n'$  étant le nombre total de conducteurs.

Pour des lignes écrantées reliées à la pénétration, les valeurs du facteur de partage du courant  $k'_e$  pour chaque conducteur  $n'$  d'un service écranté sont données par :

$$k'_e = k_e \cdot R_s / (n' \cdot R_s + R_c) \quad (\text{E.6})$$

où

$R_s$  est la résistance ohmique par unité de longueur de l'écran ;

$R_c$  est la résistance ohmique par unité de longueur d'un conducteur interne.

NOTE 2 Cette formule peut sous-estimer le rôle de l'écran dans l'écoulement des courants de foudre en raison de l'inductance mutuelle entre l'âme et l'écran.

**Tableau E.1 – Valeurs de résistance conventionnelle de terre  $Z$  et  $Z_1$  suivant la résistivité du sol**

$\rho$ $\Omega\text{m}$	$Z_1$ (*) $\Omega$	Résistance conventionnelle de terre selon les niveaux de protection du SPF (**) $Z$ $\Omega$		
		I	II	III – IV
$\leq 100$	8	4	4	4
200	11	6	6	6
500	16	10	10	10
1 000	22	10	15	20
2 000	28	10	15	40
3 000	35	10	15	60

NOTE 1 Les valeurs données dans ce tableau se réfèrent à la résistance conventionnelle de terre d'un conducteur enterré dans des conditions de choc (10/350  $\mu\text{s}$ ).

(\*) Valeurs faisant référence aux éléments conducteurs extérieurs d'une longueur de 100 m. Pour des éléments conducteurs extérieurs d'une longueur inférieure à 100 m dans un sol à haute résistivité ( $> 500 \Omega\text{m}$ ), les valeurs de  $Z_1$  peuvent être doublées.

(\*\*) Réseau de mise à la terre conforme à la CEI 62305-3, article 5.4.

### **E.1.2 Facteurs influençant le partage du courant de foudre dans le réseau de puissance**

Pour des calculs détaillés, plusieurs facteurs peuvent influencer l'amplitude et la forme d'onde de tels chocs :

- la longueur du câble peut influencer le partage du courant et les caractéristiques de la forme de l'onde en raison du rapport  $L/R$  ;

- les diverses impédances des conducteurs de neutre et des phases peuvent influencer le partage du courant parmi les lignes des conducteurs ;

NOTE 1 Par exemple, si le conducteur de neutre (N) est mis à la terre en de multiples points, l'impédance plus faible de N par rapport à celle de  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  peut conduire à un passage de 50 % du courant dans le conducteur de neutre N, les autres 50 % se partageant entre les trois conducteurs de phase (17 % dans chacun). Si N,  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  ont la même impédance, chaque conducteur transporte environ 25 % du courant.

- les diverses impédances du transformateur peuvent influencer le partage du courant (cet effet est négligeable si le transformateur est protégé par un parafoudre shuntant cette impédance) ;
- la relation entre les résistances conventionnelles du transformateur et celles de l'utilisateur peut influencer le partage du courant (plus l'impédance du transformateur est faible, plus le courant de choc dans l'installation à basse tension est élevé) ;
- les utilisateurs en parallèle entraînent une réduction de l'impédance basse tension pouvant ainsi augmenter le courant partiel de foudre s'écoulant dans le réseau.

NOTE 2 Se reporter à l'Annexe D de la CEI 62305-4 pour de plus amples informations.

## E.2 Chocs dus à des impacts sur les services connectés à la structure

### E.2.1 Chocs dus à des impacts sur les services (source de dommage S3)

Pour les impacts de foudre directs sur les services connectés à la structure, il faut prendre en compte la répartition du courant de foudre dans les deux directions du service et la rupture de l'isolation.

Le choix de la valeur  $I_{imp}$  peut se fonder sur les valeurs données dans le Tableau E.2a pour les réseaux basse tension et dans le Tableau E.2b pour les réseaux de communication si les valeurs préférentielles de  $I_{imp}$  sont associées à un niveau de protection contre la foudre (NPF).

**Tableau E.2a – Surintensités de foudre prévues dues aux impacts de foudre sur des réseaux basse tension**

NPF (Catégorie)	Réseaux basse tension			
	Impacts directs et indirects sur le service		Impact près de la structure <sup>(3)</sup>	Impact sur la structure <sup>(3)</sup>
	source de dommage S3 (impact direct) <sup>(1)</sup>	source de dommage S4 (impact indirect) <sup>(2)</sup>	source de dommage S2 (courant induit)	Source de dommage S1 (courant induit)
	Forme d'onde : 10/350 $\mu$ s [kA]	Forme d'onde : 8/20 $\mu$ s [kA]	Forme d'onde: <sup>(4)</sup> 8/20 $\mu$ s [kA]	Forme d'onde: <sup>(4)</sup> 8/20 $\mu$ s [kA]
III - IV	5	2,5	0,1	5
II	7,5	3,75	0,15	7,5
I	10	5	0,2	10
NOTE : Toutes les valeurs font référence à chaque conducteur de ligne (1) Valeurs applicables au cas du coup jusqu'au dernier pôle du service à proximité du consommateur et de la ligne à multiconducteur (triphasé + neutre) (2) Valeurs faisant référence aux lignes aériennes. Pour les lignes enterrées, les valeurs peuvent être partagées en deux. (3) Le cheminement des conducteurs à boucle et la distance du courant inducteur affectent les valeurs des surintensités de foudre prévues. Les valeurs du Tableau E.2.a font référence à un conducteur à boucle non écranté court-circuité avec différents cheminements dans des bâtiments de grande dimension (surface de boucle de l'ordre de 50 m <sup>2</sup> , largeur = 5 m), à 1 m de la paroi de la structure, à l'intérieur d'une structure non écrantée ou d'un bâtiment avec SPF ( $K_c = 0,5$ ). Pour les autres				

caractéristiques de boucle et de structure, il convient de multiplier les valeurs par les facteurs  $K_{S1}$ ,  $K_{S2}$ ,  $K_{S3}$  (voir CEI 62305-2, article B.4).

- (4) L'inductance de boucle et la résistance de boucle affectent la forme du courant induit. Lorsque la résistance de boucle est négligeable, il convient de supposer une forme 10/350  $\mu$ s. Ceci s'applique lorsqu'un parafoudre à commutation est installé dans le circuit induit.

**Tableau E.2b – Surintensités de foudre prévues dues aux impacts de foudre sur des réseaux de communication**

NPF (Catégorie)	Réseaux de communication <sup>(4)</sup>			
	Impacts directs et indirects sur le service		Impact près de la structure <sup>(3)</sup>	Impact sur la structure <sup>(3)</sup>
	source de dommage S3 (impact direct) <sup>(1)</sup> forme d'onde : 10/350 $\mu$ s [kA]	source de dommage S4 (impact indirect) <sup>(2)</sup> forme d'onde : 8/20 $\mu$ s [kA]	source de dommage S2 (courant induit) forme d'onde : 8/20 $\mu$ s [kA]	source de dommage S1 (courant induit) forme d'onde : 8/20 $\mu$ s [kA]
III - IV	1	0,015	0,1	5
II	1,5	0,025	0,15	7,5
I	2	0,035	0,2	10

NOTE : Toutes les valeurs font référence à chaque conducteur de ligne

(1) Valeurs faisant référence à des lignes non écrantées avec de nombreuses paires. Pour un fil d'embranchement non écranté, les valeurs peuvent être 5 fois supérieures.

(2) Valeurs faisant référence aux lignes aériennes. Pour les lignes enterrées, les valeurs peuvent être partagées en deux.

(3) Le cheminement des conducteurs à boucle et la distance du courant inducteur affectent les valeurs des surintensités de foudre prévues. Les valeurs du Tableau E.2.b font référence à un conducteur à boucle non écranté court-circuité avec différents cheminements dans des bâtiments de grande dimension (surface de boucle de l'ordre de 50 m<sup>2</sup>, largeur = 5 m), à 1 m de la paroi de la structure, à l'intérieur d'une structure non écrantée ou d'un bâtiment avec SPF ( $K_c = 0,5$ ). Pour les autres caractéristiques de boucle et de structure, il convient de multiplier les valeurs par les facteurs  $K_{S1}$ ,  $K_{S2}$ ,  $K_{S3}$  (voir CEI 62305-2, article B.4)

(4) Se reporter à la Recommandation K.67 de l'UIT-T pour de plus amples informations.

Pour les services écrantés, les valeurs des surintensités données dans le Tableau E.2 peuvent être réduites d'un facteur de 0,5.

NOTE Il est supposé que la résistance de l'écran est à peu près égale à celle des conducteurs en parallèle du service.

## E.2.2 Chocs dus à des impacts à proximité des services (Source de dommage S4)

Les chocs dus à des impacts à proximité d'un service présentent une énergie beaucoup plus faible que celle due à un impact direct (source de dommage S3).

Les surintensités prévues associées aux niveaux de protection spécifiés (NPF) sont données dans le Tableau E.2.

Pour les services écrantés, les valeurs des surintensités données dans le Tableau E.2 peuvent être réduites d'un facteur de 0,5.



### E.3 Chocs dus à des effets d'induction (Source de dommage S1 ou S2)

Les chocs dus à des effets d'induction de champs magnétiques générés par des impacts de foudre proches (source S2) ou par l'écoulement du courant de foudre dans le SPF extérieur ou encore dans l'écran spatial de ZPF 1 (source S1) présentent une forme d'onde typique de 8/20  $\mu$ s. De tels chocs doivent être considérés à proximité ou sur les bornes des matériels à l'intérieur de ZPF 1 et à la frontière de ZPF 1/2.

#### E.3.1 Chocs dans une ZPF 1 sans écran

A l'intérieur d'une ZPF 1 sans écran (par exemple protégée uniquement par un SPF extérieur conformément à la CEI 62305-3 avec des mailles de taille supérieure à 5 m), des chocs relativement élevés peuvent se produire en raison des effets d'induction d'un champ magnétique non amorti.

Les surintensités prévues associées aux niveaux de protection spécifiques (NPF) sont données dans le Tableau E.2.

#### E.3.2 Chocs dans des ZPF avec écran

A l'intérieur de ZPF présentant un écran spatial efficace (nécessitant des mailles de taille inférieure à 5 m conformément à la CEI 62305-4, Annexe A), l'apparition de chocs dus à des effets d'induction de champs magnétiques est fortement réduite. Dans de tels cas, les chocs sont très inférieurs à ceux indiqués en E.3.1.

Dans une ZPF 1, les effets d'induction sont faibles en raison de l'effet d'amortissement de l'écran spatial.

Dans une ZPF 2, les chocs sont considérablement réduits en raison des effets en cascade des écrans spatiaux de ZPF 1 et de ZPF 2.

### E.4 Informations générales sur les parafoudres

L'utilisation de parafoudres dépend de leur tenue aux chocs, ils sont classifiés dans la CEI 61643-1<sup>[6]</sup> pour les réseaux de puissance et dans la CEI 61643-21 pour les réseaux de communication.

Le choix des parafoudres à utiliser selon leur installation est le suivant :

- a) A la pénétration du réseau dans la structure (frontière de ZPF 1, par exemple sur le tableau principal de distribution) :
  - des parafoudres soumis à essai avec  $I_{imp}$  (forme d'onde typique 10/350), par exemple parafoudre soumis à essai conformément à la Classe I ;
  - des parafoudres soumis à essai avec  $I_n$  (forme d'onde typique 8/20), par exemple parafoudre soumis à essai conformément à la Classe II.
- b) A proximité des matériels à protéger (frontière de ZPF 2 et ZPF supérieure, par exemple sur un tableau secondaire de distribution ou sur des prises de courant) :
  - des parafoudres soumis à essai avec  $I_{imp}$  (forme d'onde typique 10/350), par exemple parafoudre soumis à essai conformément à la Classe I pour les parafoudres de puissance ;
  - des parafoudres soumis à essai avec  $I_n$  (forme d'onde typique 8/20), par exemple parafoudre soumis à essai conformément à la Classe II ;
  - des parafoudres soumis à essai en onde combinée (courant typique de forme d'onde 8/20), par exemple, parafoudre soumis à essai conformément à la Classe III.

## Bibliographie

- [1] CEI 60664-1:1992, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension – Partie 1: Principes, prescriptions et essais*
  - [2] CEI 61000-4-5: 1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-5: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux ondes de chocs*
  - [3] Berger K., Anderson R.B., Kröninger H., *Parameters of lightning flashes*. CIGRE Electra No 41 (1975), p. 23 – 37
  - [4] Anderson R.B., Eriksson A.J., *Lightning parameters for engineering application*. CIGRE Electra No 69 (1980), p. 65 - 102
  - [5] IEEE working group report, *Estimating lightning performance of transmission lines II, 1992 (A référencer correctement)*
  - [6] CEI 61643-1:2005, *Parafoudres basse tension – Partie 1: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Exigences et essais*
  - [7] CEI 61643-12:2002, *Parafoudres basse tension – Partie 12: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Principes de choix et d'application*
-