

Union internationale des télécommunications

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TELECOMMUNICATIONS
DE L'UIT

K.67

(02/2006)

SÉRIE K: PROTECTION CONTRE LES
PERTURBATIONS

Surintensions susceptibles d'être induites par la foudre dans les réseaux de télécommunication et de signalisation

Recommandation UIT-T K.67

Recommandation UIT-T K.67

Surtensions susceptibles d'être induites par la foudre dans les réseaux de télécommunication et de signalisation

Résumé

Dans la présente Recommandation sont données les caractéristiques (durées et valeurs crête) des décharges (surtensions et surintensités) induites par la foudre, qui sont susceptibles d'atteindre les lignes de télécommunication du réseau d'accès et les lignes de signalisation dans les locaux client, où sont employés des conducteurs métalliques. Les valeurs escomptées de ces surtensions sont présentées en fonction d'un ensemble de paramètres du courant de décharge, qui définissent la foudre en tant que source d'endommagements résultant des couplages électromagnétiques avec la ligne de télécommunication ou de signalisation.

La présente Recommandation permet d'évaluer l'efficacité des mesures de protection (par exemple, dispositifs de protection contre les surtensions/surintensités (SPD, *surge protective devices*)) capables de résister au courant de décharge escompté au point où est située l'installation.

Source

La Recommandation UIT-T K.67 a été approuvée le 13 février 2006 par la Commission d'études 5 (2005-2008) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8.

Mots clés

Décharge, foudre, point de transition, surintensité, surtension.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

Le respect de cette Recommandation se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la Recommandation contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et considère que la Recommandation est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la Recommandation.

DROITS DE PROPRIETE INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux développeurs de consulter la base de données des brevets du TSB sous <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© UIT 2006

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives.....	1
3 Définitions	2
4 Abréviations.....	3
5 Configuration de référence	4
6 Mesures de protection.....	5
6.1 Protection propre	5
6.2 Mesures de protection primaire	5
6.3 Liaison, mise à la terre et blindage.....	6
7 Surtensions/surintensités escomptées induites par la foudre	6
7.1 Eclairs sur un immeuble (source d'endommagements S1): courant de décharge passant à travers les lignes de télécommunication ou de signalisation pénétrant dans l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client).....	6
7.2 Eclairs proches d'un immeuble ou sur celui-ci (source d'endommagements S1 ou S2): surtensions/surintensités induites dans les lignes de télécommunication ou de signalisation à l'intérieur de l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client).....	7
7.3 Foudre sur les lignes de télécommunication ou de signalisation	10
7.4 Eclairs proches des lignes de télécommunication ou de signalisation	11
Annexe A – Surtensions à l'intérieur d'un immeuble induites par la foudre proche de l'immeuble ou sur celui-ci.....	15
A.1 Généralités.....	15
A.2 Foudre proche de l'immeuble	15
A.3 Foudre sur l'immeuble	20
Annexe B – Surtensions sur la ligne de télécommunication induites par la foudre proche de la ligne: sol parfaitement conducteur.....	22
Appendice I – Surtensions à l'intérieur d'un immeuble induites par la foudre proche de l'immeuble ou sur celui-ci: dispositif expérimental et résultats	25
I.1 Introduction	25
I.2 Modèle théorique.....	25
I.3 Site expérimental et dispositif d'essai.....	27
BIBLIOGRAPHIE	33

Introduction

La foudre est la source de surtensions et de surintensités dangereuses dans les réseaux de télécommunication et de signalisation (impacts directs ou indirects de la foudre), d'effets susceptibles d'être induits par les courants de fuite dans les lignes électriques, y compris les systèmes de distribution électrique, de contact avec les lignes électriques et de l'augmentation du potentiel de terre.

Les méthodes de protection s'appliquent soit aux lignes (par exemple, l'emploi de câbles blindés plutôt que de câbles non blindés) soit à des parties spécifiques du système. Parmi les dernières méthodes, on distingue les trois catégories suivantes:

- les techniques d'installation, telles que la liaison et la mise à la terre, et le blindage dans l'établissement et sur les lignes extérieures pour réduire le couplage électrique de la foudre avec la ligne;
- les dispositifs de protection, qui empêchent l'énergie excédentaire d'atteindre les parties vulnérables en la dérivant (par exemple, au moyen d'éclateurs) ou en déconnectant la ligne (par exemple, au moyen de fusibles); ces dispositifs de protection offrent ce qu'on nomme une "*protection primaire*";
- les équipements possédant une rigidité diélectrique, une capacité de conduite du courant et une impédance appropriées qui leur permettent de résister aux conditions auxquelles ils sont soumis; ces caractéristiques correspondent à une "*protection propre*".

Certains types de dispositifs de protection (protection primaire) protègent contre les surtensions (dispositifs SPD, par exemple, éclateurs à air munis d'électrodes au carbone ou métalliques, tubes à décharge (GDT, *gas discharge tube*), dispositifs de protection à semi-conducteur), d'autres contre les surintensités (par exemple, fusibles, bobines thermiques, dispositifs de protection contre les surintensités à autorétablissement, éléments fusibles).

En vue de spécifier les composants et les appareils de protection, il faut évaluer le pouvoir destructeur des surtensions au point précis de leur installation. Ce pouvoir ne doit pas dépasser le niveau de résistance des composants et des équipements de protection touchés. Des essais appropriés doivent permettre de déterminer ce niveau de résistance.

La présente Recommandation porte sur les surtensions susceptibles d'être induites par la foudre aux différents points d'installation de ces composants et équipements de protection dans les réseaux de télécommunication et de signalisation.

Certaines formules ou hypothèses de l'évaluation des surtensions escomptées reposent sur de fortes approximations. Une étude ultérieure permettrait d'améliorer cette évaluation.

Recommandation UIT-T K.67

Surintensions susceptibles d'être induites par la foudre dans les réseaux de télécommunication et de signalisation

1 Domaine d'application

La présente Recommandation a pour objet de définir les décharges (surtensions et surintensités) induites par la foudre, qui sont susceptibles d'atteindre les différents points de transition du réseau d'accès de télécommunication et des lignes de signalisation, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des immeubles, à savoir les bâtiments des équipements de commutation et les immeubles ou les sites distants des clients.

Le sujet de la présente Recommandation concerne les surtensions et les surintensités dans les réseaux de télécommunication et de signalisation employant des conducteurs métalliques, qui sont dues au courant de décharge, source d'endommagements, et dépendent de l'emplacement du point d'impact par rapport à la ligne considérée (voir § 3.6).

Les surtensions escomptées sont définies par leurs valeurs crête et leurs durées en fonction du niveau de protection contre les surtensions/surintensités (SPL, *surge protection level*) (voir § 3.7) pour les différents types (S₁, S₂, S₃ et S₄) de sources d'endommagements (voir § 3.6). On suppose que la forme des surtensions escomptées est une double exponentielle décrite par son temps de montée T₁ et son temps de décroissance à mi-valeur T₂.

La présente Recommandation permet d'évaluer l'efficacité des mesures de protection (par exemple, dispositifs de protection contre les surtensions/surintensités (SPD, *surge protective devices*)) capables de résister au courant de décharge escompté au point où est située l'installation.

2 Références normatives

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce document, en tant que tel, le statut d'une Recommandation.

- [1] Manuel de l'UIT-T sur la protection contre la foudre, chapitre 10 (1995), *Surintensions et surintensités mesurées sur les lignes d'abonné des télécommunications*.
- [2] Recommandation UIT-T K.46 (2003), *Protection des lignes de télécommunication à conducteurs métalliques symétriques contre les surtensions induites par la foudre*.
- [3] Recommandation UIT-T K.47 (2000), *Protection des lignes de télécommunication à conducteurs métalliques contre les décharges directes de foudre*.
- [4] Recommandation UIT-T K.56 (2003), *Protection des stations de base radioélectriques contre la foudre*.
- [5] CEI 62305-1:2006, *Protection contre la foudre. Partie 1: Principes généraux*.
- [6] CEI 62305-2:2006, *Protection contre la foudre. Partie 2: Evaluation des risques*.
- [7] CEI 62305-4:2006, *Protection contre la foudre. Partie 4: Réseaux de puissance et de communication dans les structures*.

3 Définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1 surtension dangereuse due à la foudre: surtension dont la valeur crête U_p est supérieure ou égale au niveau de résistance à la surtension de l'équipement ou de l'isolation du conducteur de la ligne de télécommunication.

3.2 temps équivalent de décroissance à mi-valeur (T_2) [1]: le temps de décroissance à mi-valeur (T_2) d'une impulsion de tension ou d'intensité est l'intervalle de temps séparant l'origine virtuelle et l'instant où la tension ou l'intensité atteignent pour la première fois la moitié de leurs valeurs crête dans le signal de traîne. (L'origine virtuelle d'une impulsion de tension ou d'intensité est l'instant qui précède celui où la tension ou l'intensité atteignent 30% ou 10% de leurs valeurs crête en des temps respectivement égal à $0,3 \cdot T_1$ et $0,1 \cdot T_1$.)

3.3 temps de montée (T_1) [1]: le temps de montée T_{1v} d'une impulsion de tension est défini comme égal à 1,67 fois l'intervalle de temps séparant les instants où la tension est égale à 30% et à 90% de sa valeur crête.

Le temps de montée T_{1i} d'une impulsion d'intensité est défini comme égal à 1,25 fois l'intervalle de temps séparant les instants où l'intensité est égale à 10% et à 90% de sa valeur crête.

3.4 niveau de protection contre la foudre: ensemble de paramètres du courant de décharge, qui définissent la foudre en tant que source d'endommagements [4].

NOTE – Le niveau de protection contre la foudre (LPL, *lightning protection level*) est employé lors de la conception des composants de protection contre celle-ci (par exemple, section des conducteurs, épaisseur des tôles, courant admissible dans le dispositif de protection contre les surtensions/surintensités (SPD), distance à respecter par rapport à la projection dangereuse d'étincelles) et pour définir les paramètres d'essai lors de la simulation des effets de la foudre sur ces composants, conformément à l'ensemble pertinent de paramètres du courant de décharge. Quatre niveaux de protection (de I à IV) sont introduit dans les normes CEI 62305. Pour chaque niveau LPL, on fixe un ensemble de valeurs maximales pour les paramètres du courant de décharge (Tableau 1).

3.5 valeur crête (x_p) [1]: la valeur crête x_p d'une surtension/surintensité est définie comme la valeur maximale observée durant la décharge.

3.6 source d'endommagements: la source d'endommagement dépend de la position du point d'impact par rapport à la ligne considérée:

- source d'endommagements S_1 : éclairs sur l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client) dans lequel pénètre la ligne de télécommunication ou de signalisation;
- source d'endommagements S_2 : éclairs proches de l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client) dans lequel pénètre la ligne de télécommunication ou de signalisation;
- source d'endommagements S_3 : éclairs sur les lignes de télécommunication pénétrant dans l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client);
- source d'endommagements S_4 : éclairs proches des lignes de télécommunication pénétrant dans l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client).

3.7 niveau de protection contre les surtensions/surintensités (SPL, *surge protection level*): valeurs crête et durées des surtensions ou surintensités dangereuses escomptées, qui peuvent apparaître en différents points des réseaux de télécommunication et sont dues au courant de décharge, source d'endommagements.

NOTE – Trois niveaux de protection contre les surtensions/surintensités (de I à III) sont introduits dans la présente Recommandation. Pour chaque niveau SPL, on évalue les valeurs crête et la durée des surtensions et des surintensités dangereuses escomptées.

3.8 pente du front montant ou vitesse de montée (S) [1]: la pente du front montant ou vitesse de montée S , est la vitesse moyenne de variation de la tension ou de l'intensité. Elle peut être déterminée par le rapport de la valeur crête x_p au temps de montée T_1 :

$$S = \frac{x_p}{T_1} \quad (1)$$

3.9 surtension ou surintensité: tension ou intensité temporaire anormalement élevées, qui sont couplées avec une ligne de télécommunication et sont dues à une source électrique externe.

NOTE 1 – Des sources électriques typiques sont la foudre et les systèmes d'alimentation à courant continu ou alternatif.

NOTE 2 – Le couplage avec la source électrique peut être l'un des couplages suivants ou plusieurs d'entre eux: couplage électrique (couplage capacitif), couplage magnétique (couplage inductif), couplage conducteur (résistif), couplage électromagnétique.

3.10 surtension due à la foudre: surtension due à la foudre résultant d'un couplage électromagnétique (conducteur, inductif et capacitif).

NOTE – Elle est caractérisée par les cinq paramètres suivants: valeur crête, temps de montée (T_1), et temps de décroissance à mi-valeur, T_2 , (ou paramètres temps T_1/T_2), pente et énergie spécifique.

3.11 dispositif de protection contre les surtensions/surintensités (SPD): dispositif qui limite la tension due à une décharge dans un port ou des ports donnés, lorsqu'elle dépasse un niveau fixé d'avance.

NOTE 1 – Un dispositif SPD regroupe un circuit et un fusible de protection.

NOTE 2 – Des fonctions secondaires peuvent être incorporées, telles que la limitation de l'intensité afin de limiter celle-ci dans un terminal

NOTE 3 – Généralement, le circuit de protection a au moins un composant non linéaire de protection limitant les surtensions.

4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

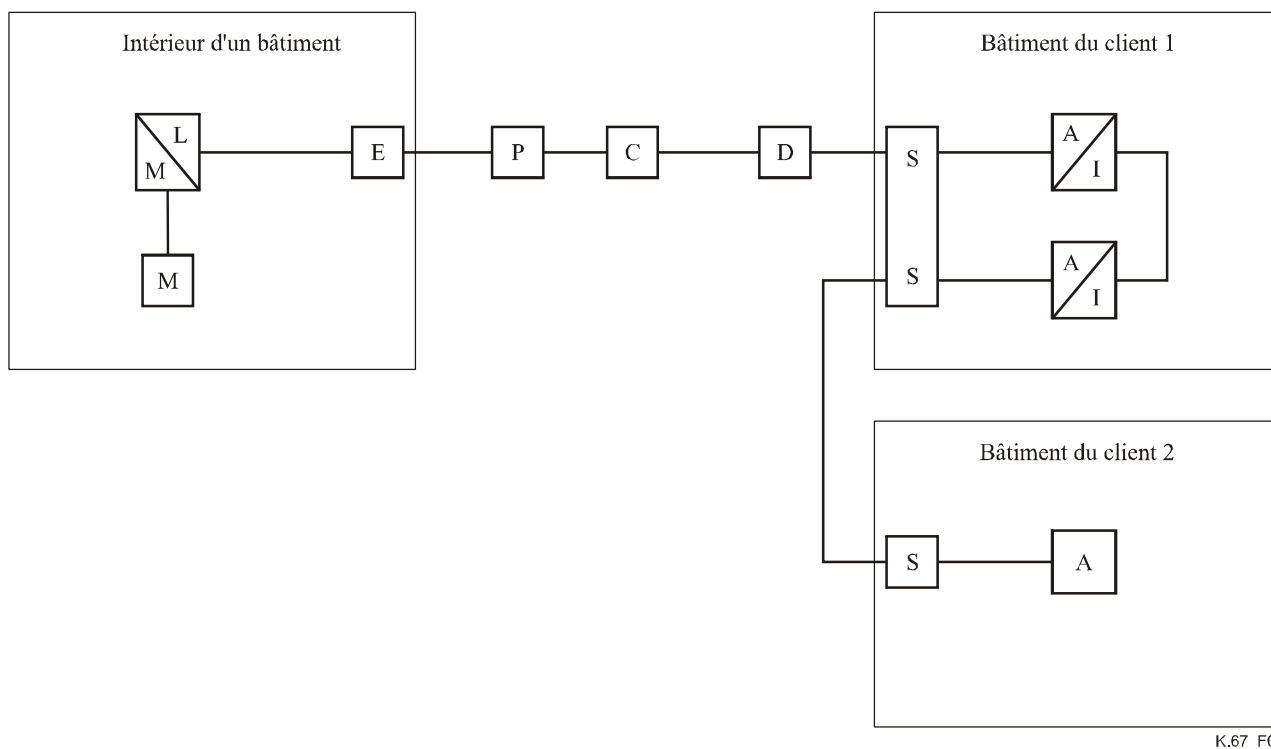
BN	réseau équipotentiel (<i>bonding network</i>)
CBN	réseau équipotentiel commun (<i>common bonding network</i>)
E	équipement de commutation (<i>exchange</i>)
LPL	niveau de protection contre la foudre (<i>lightning protection level</i>)
MDF	répartiteur principal (<i>main distribution frame</i>)
MET	terminal principal de mise à la terre (<i>main earthing terminal</i>)
NT	terminaison de réseau (<i>network termination</i>)
S	abonné (<i>subscriber</i>)
SPD	dispositif de protection contre les surtensions/surintensités (<i>surge protective device</i>)
SPL	niveau de protection contre les surtensions/surintensités (<i>surge protection level</i>)

5 Configuration de référence

Dans la Figure 1 sont illustrées des configurations de référence pour les lignes de télécommunication à conducteurs métalliques symétriques, où les nœuds de référence et les sections de câbles entre les nœuds sont indiquées.

Les points de transition de la Figure 1 peuvent être décrits comme suit [2]:

- point de transition L: transition entre l'interface de l'équipement de commutation à l'intérieur d'un bâtiment et le câblage extérieur;
- point de transition E: entrée du bâtiment de l'équipement de commutation, à savoir le répartiteur principal (MDF, *main distribution frame*);
- point de transition P: transition entre des câbles enterrés isolés par du papier et des câbles enterrés isolés par du plastique;
- point de transition C: transition entre des câbles enterrés et des câbles aériens;
- point de transition D: transition entre des câbles blindés et des câbles non blindés;
- point de transition S: entrée du bâtiment du client;
- point de transition A: transition entre l'interface de l'équipement à l'intérieur du bâtiment du client et le câblage extérieur;
- point de transition M: transition entre l'interface de l'équipement de commutation à l'intérieur d'un bâtiment et le câblage intérieur;
- point de transition I: transition entre l'interface de l'équipement à l'intérieur du bâtiment du client et le câblage intérieur.



K.67_F01

Figure 1/K.67 – Configuration de référence

6 Mesures de protection

6.1 Protection propre

Afin d'assurer sa protection et de limiter les risques de son endommagement, il est nécessaire d'employer un équipement possédant des caractéristiques propres de résistance (électromagnétique), à savoir une rigidité diélectrique, une capacité de conduite du courant et une impédance appropriées, afin de pouvoir résister aux conditions auxquelles il est soumis.

Les prescriptions en matière de résistance de l'équipement de télécommunication employé aux différents points des réseaux de télécommunication ont été définies dans les Recommandations UIT-T K.20, K.45 et K.21 pour l'équipement de commutation à l'intérieur d'un bâtiment, pour l'équipement dans le réseau d'accès et pour l'équipement à l'intérieur du bâtiment du client, respectivement.

Du point de vue de la protection contre la foudre, ces prescriptions en matière de résistance permettent à l'équipement de résister à la plupart des surtensions induites par la foudre proche de la ligne (voir le § 7.4). Parce que ces surtensions sont les plus fréquentes, comparées à d'autres surtensions, l'emploi de mesures de protection supplémentaires (protection primaire) se limite aux installations "exposées", qui ont fait l'objet d'une évaluation des risques [2, 3, 6].

6.2 Mesures de protection primaire

L'emploi de mesures de protection primaire empêche l'énergie anormalement élevée d'atteindre les parties vulnérables des installations de télécommunication et de signalisation (par exemple, isolation de l'équipement et des conducteurs). A ces fins, la protection primaire doit être installée de façon appropriée et ses caractéristiques doivent être choisies de manière pertinente.

L'efficacité de la protection primaire dépend de sa capacité à conduire les surintensités (pour les dispositifs limitant la tension, tels que les tubes à décharge (GDT, *gas discharge tube*)) ou résistant à des surtensions (pour les dispositifs limitant l'intensité, tels que les fusibles). Les paramètres de la foudre qui déterminent les valeurs maximales des surtensions et des surintensités sont donnés dans le Tableau 1 en fonction du niveau de protection contre la foudre (LPL, *lightning protection level*). Ces valeurs maximales pour les surtensions et les surintensités sont associées aux niveaux de protection contre les surtensions/surintensités (SPL, *surge protection level*) suivants: SPL I = 0,01, SPL II = 0,02 et SPL III = 0,05 qui donnent les probabilités pour que la surtension ou la surintensité dangereuse soit supérieure ou égale à la valeur crête associée.

Tableau 1/K.67 – Valeurs maximales des paramètres de la foudre en fonction du niveau LPL

Paramètres du courant		Symbole	Unité	Niveau LPL			
				I (99%)	II (98%)	III (95%)	IV
Première courte décharge	Intensité de crête	I_p	kA	200	150	100	
	Charge de la courte décharge	Qshort	C	100	75	50	
	Energie spécifique	W/R	kJ/ Ω	10 000	5 625	2 500	
	Paramètres de temps	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	10/350			
Courte décharge suivante	Intensité de crête	I_p	kA	50	37,5	25	
	Pente moyenne	di/dt	kA/ μs	200	150	100	
	Paramètres de temps	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	0,25/100			

**Tableau 1/K.67 – Valeurs maximales des paramètres de la foudre
en fonction du niveau LPL**

Paramètres du courant		Symbole	Unité	Niveau LPL			
				I (99%)	II (98%)	III (95%)	IV
Longue décharge	Charge de la longue décharge	Qlong	C	200	150	100	
	Paramètres de temps	Tlong	s	0,5			
Eclair	Charge de l'éclair	Qflash	C	300	225	150	

6.3 Liaison, mise à la terre et blindage

L'emploi de techniques d'installation qui assurent la liaison, la mise à la terre et le blindage permet de réduire le couplage entre la foudre et la ligne de communication. En cas d'impacts directs de la foudre ou d'impacts proches de la ligne, le réseau équipotentiel commun (CBN, *common bonding network*) de l'immeuble et les réseaux équipotentiels (BN, *bonding network*) des équipements répartissent le courant de décharge et assurent ainsi le blindage des lignes intérieures. Un blindage ou un conduit encerclant complètement les équipements peuvent efficacement réduire la tension et l'intensité couplées aux conducteurs de communication. Le paramètre critique en ce qui concerne l'efficacité du blindage du câble est son impédance de transfert, qui pour des blindages solides aux fréquences de la foudre est approximativement égale à la résistance (en courant continu) du blindage.

La protection primaire ajoutée aux mesures de liaison et de mise à la terre forme une barrière électromagnétique autour des installations qui réduit la pénétration dans ces installations de perturbations électromagnétiques venant de l'extérieur.

7 Surtensions/surintensités escomptées induites par la foudre

7.1 Eclairs sur un immeuble (source d'endommagements S_1): courant de décharge passant à travers les lignes de télécommunication ou de signalisation pénétrant dans l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client)

Le courant d'une décharge directe sur un immeuble passe dans le système de mise à la terre de l'immeuble ainsi que dans les services qui pénètrent dans l'immeuble. Une partie du courant de décharge pénètre donc dans la gaine du câble ou dans les conducteurs du câble de la ligne de télécommunication ou de signalisation, soit directement soit par l'intermédiaire des dispositifs de protection contre les surtensions/surintensités (SPD) auxquels ils sont reliés, puisque le câble fait partie des services pénétrant dans l'immeuble.

Les paramètres du courant de décharge sont ceux qui sont donnés dans le Tableau 1 en fonction du niveau LPL choisi pour la première courte décharge. Le courant de décharge pénétrant dans la ligne de télécommunication ou de signalisation est donc décrit par une durée de 10/350 μ s et une valeur crête (I_f).

En première approximation, on peut supposer que la moitié du courant de décharge (I) passe dans le système de terminaison de terre et que l'autre moitié se répartit entre les n services qui pénètrent dans l'immeuble.

Si la ligne de télécommunication ou de signalisation entrante n'est pas blindée ou acheminée dans un conduit métallique, chacun des m conducteurs de la ligne achemine une partie de crête égale (I_f), du courant de décharge, calculée au moyen de la formule suivante:

$$I_f = \frac{0,5 \times I_p}{n \times m} \quad \text{pour une ligne non blindée} \quad (2)$$

Pour des lignes blindées (ou acheminées dans un conduit métallique), mises à la masse à l'entrée de l'immeuble, les valeurs crête (I_f), du courant pénétrant dans chacun des m conducteurs sont obtenues au moyen de la formule suivante:

$$I_f = \frac{0,5 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{pour une ligne blindée} \quad (3)$$

où:

R_s est la résistance ohmique par unité de longueur du blindage ou du conduit métallique

R_c est la résistance ohmique par unité de longueur du conducteur

La tension à vide entre un conducteur et le terminal principal de mise à la terre (MET, *main earthing terminal*) est approximativement proportionnelle au produit de la résistance de terre par la partie du courant de décharge qui passe dans le réseau de mise à la terre si le câble n'est pas blindé. Si le câble est blindé, la tension à vide entre un conducteur et le terminal MET qui est relié au blindage du câble est approximativement proportionnelle au produit de la résistance du blindage par la partie du courant de décharge qui passe à travers le blindage, limitée par la tension de rupture des conducteurs de l'âme par rapport au blindage (par exemple, 5 kV). Lorsque le blindage est régulièrement mis à la terre, le courant dans le blindage diminue au fur et à mesure qu'il s'éloigne du point d'impact. La propagation de la décharge dans le câble conduit à la dispersion et à l'augmentation du temps de décroissance.

Même en envisageant la possibilité d'une ionisation de la terre proche des électrodes, la grandeur de la tension résultante est vraisemblablement suffisamment élevée pour que la protection primaire puisse être assurée ou, s'il n'y a pas de protection, pour conduire à la dégradation de l'isolation des conducteurs. Des méthodes de calcul détaillées de la tension de crête ne sont donc pas examinées ici. Ceci vaut tant pour les lignes de télécommunication non blindées que blindées.

7.2 Eclairs proches d'un immeuble ou sur celui-ci (source d'endommagements S1 ou S2): surtensions/surintensités induites dans les lignes de télécommunication ou de signalisation à l'intérieur de l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client)

L'éclair proche d'un immeuble ou sur celui-ci induit des surtensions de mode commun dans les lignes de télécommunication ou de signalisation à l'intérieur de l'immeuble (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou site distant du client), dues à la dérivée par rapport au temps de l'intensité. La valeur crête V_{io} de la tension à vide induite se calcule au moyen de l'expression suivante:

$$V_{io} = L_M \times \frac{di}{dt} = L_M \times \frac{I_p}{T_1} \quad (4)$$

où:

L_M est l'inductance mutuelle entre la boucle induite et le courant de décharge

I_p est la valeur crête de l'intensité de décharge

T_1 est le temps de montée de l'intensité de décharge

Le paramètre du courant de décharge est la pente moyenne (di/dt), égale au rapport entre la valeur crête (I_p), et le temps de montée (T_1) (voir § 3.8), des décharges suivantes (cas le plus défavorable) mentionnées dans le Tableau 1 en fonction du niveau LPL choisi.

On s'attend que la durée des tensions à vide induites soit très courte (de l'ordre de quelques μs , par exemple, de 2 μs à 10 μs) et que le temps de montée soit semblable à celui de la décharge suivante (c'est-à-dire 0,25 μs), comme indiqué à l'Appendice I par les mesures des tensions dans une boucle, induites par le déclenchement de décharges.

La valeur crête de l'intensité en court-circuit (I_{sc}), en négligeant la résistance ohmique des lignes en boucle (cas le plus défavorable), est évaluée comme suit:

$$I_{sc} = \frac{V_{oi} \times T_1}{L_S} \quad (5)$$

ou

$$I_{sc} = \frac{L_M}{L_S} \times I_p \quad (6)$$

où:

L_S est l'inductance propre de la boucle inductive

En ce qui concerne l'intensité en court-circuit (I_{sc}), le paramètre du courant de décharge est la valeur crête (I_p), des premières décharges (cas le plus défavorable) mentionnées dans le Tableau 1 en fonction du niveau LPL choisi. Sa durée est celle de la décharge (voir Appendice I). Donc, dans le cas le plus défavorable, sa durée est de 10/350 μs .

Les valeurs crête de la tension à vide (V_{oi}), dues aux décharges suivantes, et l'intensité en court-circuit (I_{si}), due aux premières décharges, sont mentionnées dans le Tableau 2, pour différents niveaux SPL. Ces valeurs ont été évaluées, comme indiqué à l'Annexe A (§ A.2 et A.3), pour une boucle non blindée dont l'aire est de 50 m^2 ($h = 5$ m; $e = 10$ m), qui est située à l'intérieur d'un immeuble non blindé.

Tableau 2/K.67 – Tensions à vide et intensités en court-circuit escomptées par conducteur aux différents nœuds d'une ligne de télécommunication ou de signalisation, qui sont induites par les éclairs sur l'immeuble (S₁), sur la ligne de télécommunication (S₃) et proches de l'immeuble (S₂)

	Eclairs sur l'immeuble, source d'endommagements S ₁			Eclairs proches de l'immeuble, source d'endommagements S ₂		Eclairs sur la ligne de télécommunication, source d'endommagements S ₃	
Niveau SPL	Nœuds E et S	Nœuds L, A, M et I (Note 1) (1 conducteur de descente seulement) (voir Tableau A.2)		Nœuds L, A, M et I (Note 1) (voir Tableau A.1)		Nœuds L, E, P	Nœuds C, D, S, A
	(partie du courant de décharge en direct) durée: 10/350 µs [kA]	(tension induite par les décharges suivantes) durée: 0,25/2 µs [kV]	(intensité induite par la première décharge) durée: 10/350 µs [kA]	(tension induite par les décharges suivantes) durée: 0,25/2 µs [kV]	(intensité induite par la première décharge) durée: 10/350 µs [kA]	(partie du courant de décharge en direct) durée: 10/350 µs [kA]	(partie du courant de décharge en direct) durée: 10/350 µs [kA]
I	Equation (2) ou (3)	250	6	5	0,1	0,50 (Note 2)	Equation (12) ou (14)
II	Equation (2) ou (3)	190	4,5	3,5	0,07	0,50 (Note 2)	Equation (12) ou (14)
III	Equation (2) ou (3)	125	3	2,2	0,05	0,50 (Note 2)	Equation (12) ou (14)
NOTE 1 – Conditions de calcul: immeuble non blindé; ligne touchée non blindée; dimensions de la boucle: 50 m² (h = 5 m; e = 10 m); rayon du conducteur en boucle: 0,5 mm. NOTE 2 – Dans des cas particuliers, on peut employer les équations (12) ou (14). La tension de rupture de la ligne à la terre est supposée être égale à 100 kV et la ligne est court-circuitée à la terre au niveau du premier point d'intérêt.							

Pour une ligne en boucle inductive dont l'aire est différente, alors que sa longueur est la même, les valeurs des surtensions données dans le Tableau 2 doivent être multipliées par le facteur (K_r) suivant:

$$K_r = A/50 \quad (A \text{ est l'aire de la boucle en m}^2) \quad (7)$$

L'équation (5) permet alors d'évaluer l'intensité en court-circuit (I_{sc}), en calculant l'inductance propre (L_s) de la nouvelle boucle.

Pour des lignes blindées, les valeurs des surtensions mentionnées dans le Tableau 2 peuvent être réduites d'un facteur K_{s3} obtenu au moyen de l'équation suivante:

$$K_{s3} = K_r \times K_{ss} \quad (8)$$

où:

$$K_{ss} = \frac{V_{cs}}{V_{io}} \quad (9)$$

V_{cs} étant la tension entre le conducteur et le blindage, qui s'exprime au moyen de la formule suivante:

$$V_{cs} = R \times I_{sc} \quad (10)$$

A l'aide des équations (4) et (5) pour les grandeurs V_{io} et I_{sc} respectivement, l'équation (8) peut s'écrire:

$$K_{ss} = \frac{R \times T_1}{L_S} \quad \text{valable pour } (L_S/R) \gg T_1 \quad (11)$$

où:

K_{ss} étant la valeur du facteur d'écran lié au blindage et R la résistance du blindage exprimée en Ω .

NOTE – L'équation (10) est valable pour des gaines tubulaires. Pour des gaines tressées, il s'agit d'une approximation.

Les valeurs des surintensités pour des aires de boucles différentes peuvent être évaluées en supposant qu'aussi bien la surtension induite que l'inductance de la boucle ont des valeurs différentes (voir § A.2 et A.3).

7.3 Foudre sur les lignes de télécommunication ou de signalisation

Deux situations peuvent se présenter:

- a) le point d'impact est très éloigné de l'immeuble;
- b) le point d'impact est proche de l'immeuble.

Dans les deux situations, le courant de décharge pénétrant dans la ligne de télécommunication ou de signalisation est décrit par une durée de $10/350 \mu s$ et une valeur crête de I_f . En négligeant les effets de propagation, on suppose que cette même durée vaut en différents sites du réseau (bâtiment de l'équipement de commutation ou immeuble ou sites distants du client).

Dans la situation a), l'intensité totale de crête dans la ligne sera, dans le cas le plus défavorable, égale à la tension de rupture de terre divisée par l'impédance de décharge dans la ligne (par exemple, $2 \times 100 \text{ kV} / 400 \Omega = 500 \text{ A}$); ce cas le plus défavorable est indépendant des niveaux LPL I à IV. Toutefois, si la ligne est blindée et que le blindage est régulièrement mis à la terre, l'analyse faite dans la situation b) s'applique.

Dans la situation b), la répartition du courant de décharge dans les deux directions du réseau de télécommunication et vers la terre doivent être pris en compte. En première approximation, on peut supposer qu'une moitié du courant de décharge (I_p), passe dans la terre et que la moitié des 50% restants se propage dans les deux directions, se répartissant entre les services n proches les uns des autres.

Si la ligne de télécommunication ou de signalisation n'est pas blindée ou acheminée dans un conduit métallique, chacun des m conducteurs de la ligne transporte une partie de crête égale (I_f), du courant de décharge qui peut être évaluée au moyen de la formule suivante:

$$I_f = \frac{0,25 \times I_p}{n \times m} \quad \text{pour une ligne non blindée} \quad (12)$$

avec $n = 1$ ou 2 ; le dernier cas s'applique, par exemple, lorsque des lignes de télécommunication ou des lignes électrique sont proches les unes des autres et qu'elles se partagent les mêmes poteaux.

La valeur obtenue au moyen de l'équation (12) doit être égale ou inférieure à la valeur suivante:

$$I_f \leq 8 \times A \quad [\text{kA}] \quad (13)$$

où A est l'aire de la section du conducteur de télécommunication ou de signalisation [mm^2].

Pour des lignes blindées (ou acheminées dans un conduit métallique), mises à la masse à l'entrée de l'immeuble, les valeurs crête (I_f) du courant pénétrant dans chacun des m conducteurs sont obtenues à l'aide de la formule suivante:

$$I_f = \frac{0,25 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{pour des lignes blindées} \quad (14)$$

où:

R_s est la résistance ohmique par unité de longueur du blindage ou du conduit métallique

R_c est la résistance ohmique par unité de longueur du conducteur

La tension à vide entre un conducteur et le blindage est approximativement proportionnelle au produit de la résistance du blindage par la partie du courant de décharge qui passe dans le blindage, limitée par la tension de rupture des conducteurs de l'âme par rapport au blindage (par exemple, 5 kV). Lorsque le blindage est régulièrement mis à la terre, le courant dans le blindage diminue au fur et à mesure qu'il s'éloigne du point d'impact. La propagation de la décharge dans le câble conduit à la dispersion et à l'augmentation du temps de décroissance.

Pour le bâtiment de l'équipement de commutation, la foudre frappe généralement la ligne aérienne (quelques paires) loin de l'installation. Dans cette situation, les valeurs mentionnées dans le Tableau 2 peuvent être employées. Dans des situations particulières, il convient d'utiliser les équations (12), (13) et (14).

En ce qui concerne l'immeuble du client, le cas le plus défavorable est celui pour lequel le point d'impact est proche de la structure. Dans ce cas, on peut employer les valeurs évaluées au moyen des équations (12), (13) et (14) ci-dessus.

NOTE – On ne dispose que de peu d'informations sur les surintensités induites par la foudre sur les lignes de télécommunication. Dans le chapitre 10 du Manuel sur la protection contre la foudre, l'étude effectuée par le Canada indique que *"L'événement 300 A × 300 μs à mi-valeur était le résultat d'une décharge orageuse directe sur un poteau à 200 m environ d'un site équipé de parafoudre. Ce site était aussi pourvu d'un compteur à seuil et d'un oscilloscope numérique. Le câble et le poteau ont été sérieusement endommagés."* Aucune information n'est disponible sur la valeur crête de l'intensité de la foudre qui frappe la ligne. Si l'on suppose que cette surintensité de 300 A a été causée par une surintensité de la foudre de 30 kA, valeur dont la probabilité est de 50%, alors il est possible d'évaluer les valeurs de 2 ou de 1 kA associées aux niveaux LPL I ou III, respectivement. Des résultats semblables peuvent être obtenus en employant l'équation (6) avec $n = 1$ et $m = 20$ pour une intensité de la foudre de 200 kA (LPL I) ou 100 kA (LPL III).

7.4 Eclairs proches des lignes de télécommunication ou de signalisation

7.4.1 Généralités

Les valeurs crête des surtensions et des surintensités induites par la foudre, qui sont susceptibles de se produire en certains points de transition du réseau de télécommunication, ont fait l'objet de plusieurs études dans différents pays. Les résultats de ces études ont été communiqués dans le chapitre 10 du Manuel sur la protection contre la foudre [1].

Les prescriptions en matière de résistance propres à l'équipement de télécommunication, telles qu'elles sont stipulées dans les Recommandations UIT-T K.20, K.21 et K.45, sont fondées sur les résultats de ces études.

L'emploi de mesures de protection supplémentaires (protection primaire) se limite aux installations "exposées", qui ont fait l'objet d'une évaluation des risques [2, 3, 6].

Le cas le plus défavorable en ce qui concerne les effets induits est représenté dans la Figure 2, où l'éclair est situé à égale distance des extrémités de la ligne de télécommunication et à une distance "x" de cette ligne, qui est aérienne et a une hauteur de 6 m ($h = 6$).

Les surtensions et les surintensités dangereuses escomptées sont évaluées au milieu et aux extrémités de la ligne.

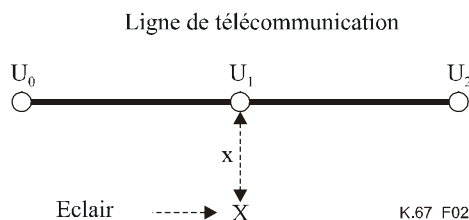


Figure 2/K.67 – Configuration de référence pour une évaluation des surtensions/surintensités induites par la foudre proche de la ligne (cas le plus défavorable)

Le niveau SPL est défini comme suit:

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)} \quad (15)$$

où:

U_{SPL} est la tension correspondante au niveau SPL choisi

U_R est une tension de référence (inférieure à la tension U_{SPL}) qui définit le niveau de tension, pour une résistance minimale, de l'équipement relié à la ligne ou de l'isolation du conducteur de la ligne

$N_T(U)$ est le nombre total d'impacts qui induisent une tension égale ou supérieure à U

Le calcul du nombre N_T et de la tension U_{SPL} est donné à l'Annexe B pour une ligne aérienne, tant non blindée que blindée, placée au-dessus d'un sol parfaitement conducteur.

A l'Annexe B il est aussi proposé une méthode de calcul des intensités en court-circuit associées à des surtensions dangereuses.

7.4.2 Valeurs calculées (sol parfaitement conducteur)

Les valeurs crête des surtensions à vide et des surintensités en court-circuit dangereuses, qui sont escomptées aux points de transition P, C et D (proches du milieu) de la ligne aérienne non blindée sont données dans le Tableau 5 pour différents niveaux SPL. Les durées des surtensions et des surintensités varient fortement en fonction des caractéristiques du courant de décharge (durée, valeur crête et vitesse), de la distance entre la décharge et la ligne et des caractéristiques de la ligne (connexions de mise à la terre, blindage, etc.). Pour un courant de décharge et une ligne non blindée donnés, si l'on augmente la distance entre la décharge et la ligne, la tension et la surintensité induites seront plus faibles, tandis que les durées seront plus longues.

Pour les courants de décharge considérés dans le Tableau 1, pour la vitesse de la décharge en retour égale à 130 m/μs et pour des tensions induites correspondant à l'intervalle de niveaux SPL choisi (à savoir, de 0,01 à 0,05), la forme d'onde des tensions et des intensités induites sur une ligne non blindée peut être représentée par une double exponentielle de durée de 8/20 μs. Pour une ligne blindée, la valeur crête est inférieure et la durée est plus longue, de sorte qu'une double exponentielle de durée de 10/700 μs est plus représentative.

NOTE – La durée de 8/20 μs pour une ligne aérienne non blindée a été calculée en employant la référence [5] et en supposant que la vitesse de la décharge en retour était égale à 130 m/μs. Pour la ligne blindée, on a supposé que la durée était conforme aux mesures.

7.4.3 Valeurs mesurées (sol non parfaitement conducteur)

Les surtensions et les surintensités qui peuvent être observées dans le réseau d'accès ont été mesurées dans plusieurs pays et les résultats des mesures sont donnés dans le chapitre 10 du Manuel sur la protection contre la foudre [1]. Le Tableau 3 contient un récapitulatif de ces résultats.

Ces données ont été recueillies sur le terrain, sur des lignes constituées d'un mélange de sections blindées enterrées et aériennes et souvent d'une courte section non blindée proche du client (le *câble de branchement*). La plupart des données ont été mesurées au niveau de l'équipement de commutation et aux extrémités abonnées. Dans le Tableau 3, la tension U_e est la tension entre la paire et le blindage, mesurée à l'extrémité commutateur et i_{sce} est l'intensité en court-circuit associée, tandis que U_s est la tension à vide entre la paire (ou l'un des conducteurs de la paire) et la terre à l'extrémité client et que i_{scs} est l'intensité en court-circuit associée.

Tableau 3/K.67 – Surtensions à vide et intensités en court-circuit mesurées aux extrémités commutateur et client

Probabilité	Extrémité commutateur		Extrémité client	
	U_e [V]	i_{sce} [A]	U_s [V]	i_{scs} [A]
0,01	860	17	2300	23
0,02	680	13	1640	16
0,05	480	8	1020	10

En supposant une résistance de blindage $R_s = 5 \Omega$, une résistance de terre de la connexion du blindage à la terre proche du client $R_t = 40 \Omega$ et une impédance de décharge $Z = 100 \Omega$ pour la section enterrée et $Z = 400 \Omega$ pour la section aérienne, on obtient $\eta_{ss} = 0,05$ et $\eta_{se} = 0,1$.

Avec ces valeurs pour le facteur d'écran, il est possible d'évaluer à partir des données mesurées la distribution tronquée ($U_R = 50$ V) à l'extrémité commutateur et ($U_R = 150$ V) à l'extrémité client. Les valeurs crête dangereuses des surtensions et surintensités sont indiquées dans le Tableau 4 en fonction du niveau SPL.

Tableau 4/K.67 – Surtensions à vide et intensités en court-circuit dangereuses mesurées aux extrémités commutateur et client

Niveau SPL	Extrémité commutateur		Extrémité client	
	U_e [V]	i_{sce} [A]	U_s [V]	I_{scs} [A]
I	1000	20	3500	35
II	750	15	2500	25
III	500	10	1500	15

Ces valeurs sont aussi indiquées dans le Tableau 5.

Tableau 5/K.67 – Tensions à vide et intensités en court-circuit escomptées par conducteur aux différents nœuds d'une ligne de télécommunication ou de signalisation, qui sont induites par les éclairs proches de la ligne de télécommunication (S₄)

	Eclairs proches de la ligne de télécommunication ou de signalisation, (cas le plus défavorable) source d'endommagements S ₄									
Niveau SPL	Nœuds L, E, P, C		Nœuds D, S, A		Nœuds L, E, P, C (calcul η _s = 0,05)	Nœuds L, E, P, C (mesure)		Nœuds D, S, A (calcul η _e = 0,1)	Nœuds D, S, A (mesure)	
	Ligne non blindée ⁽¹⁾				Ligne composée de sections blindées enterrées (nœuds E-C), de sections blindées aériennes (nœuds C-D) et de sections non blindées aériennes (nœuds C-S)					
	Tension induite: 8/20 μs [kV]	Intensité induite: 8/20 μs [A]	Tension induite: 8/20 μs [kV]	Intensité induite: 8/20 μs [A]	Tension induite: 10/700 μs [kV]	Tension induite: 10/700 μs [kV]	Intensité induite: 10/350 μs [A]	Tension induite: 10/700 μs [kV]	Tension induite: 10/700 μs [kV]	Intensité induite: 10/350 μs [A]
I	44	110	64	160	1	1	20	6,4	3,5	35
II	23	60	34	85	0,75	0,8	15	3,4	2,5	25
III	10	25	14	35	0,5	0,6	10	1,4	1,5	15
NOTE – Conditions de calcul: ligne aérienne et sol parfaitement conducteur.										

Annexe A

Surintensités à l'intérieur d'un immeuble induites par la foudre proche de l'immeuble ou sur celui-ci

A.1 Généralités

Les surtensions induites par la foudre dans les boucles formées par le câblage dans une installation est un sujet important dans nombre de Recommandations de la série K. Elles sont caractérisées par leurs durées et leurs valeurs crête.

L'Appendice I donne les durées de ces surtensions induites, obtenues à partir des résultats de mesures effectuées sur un site expérimental.

Les valeurs crête de la tension à vide (V_{i0}) et de l'intensité en court-circuit (I_{i0}) induites dans la boucle sont évaluées dans les § A.2 et A.3 pour des éclairs proches de l'immeuble ou sur celui-ci, respectivement.

A.2 Foudre proche de l'immeuble

La valeur crête de la tension à vide (V_{i0}) dans la boucle à l'intérieur de l'immeuble, induite par la foudre proche de celui-ci, peut être calculée à l'aide de l'équation (4), où l'inductance mutuelle (L_M) est obtenue au moyen de l'équation approchée suivante (en supposant que le champ magnétique incident est une onde plane) [3, 6]:

$$L_M = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times \ln \left(\frac{f + d + e}{f + d} \right) \quad [\mu H] \quad (A.1)$$

où (voir Figure A.1):

h largeur ou hauteur de la boucle [m]

e longueur de la boucle [m]

f distance entre le canal de décharge et le mur de l'immeuble [m]

d distance entre la boucle et le mur de l'immeuble

$\eta = 0,12 \times w$ facteur d'écran lié au blindage de l'immeuble (blindage de la zone 1 de protection contre la foudre (LPZ, *lightning protection zones*) (LPZ 1), où $w \leq 5$ m, w étant la largeur des mailles du blindage spatial de type grillage [5, 6]

K_s facteur d'écran tenant compte de l'effet du blindage du câble

et:

I_{ps} valeur crête des décharges suivantes (Tableau 1) [kA]

$T_1 = 0,25$ temps de montée des décharges suivantes (Tableau 1) [μs]

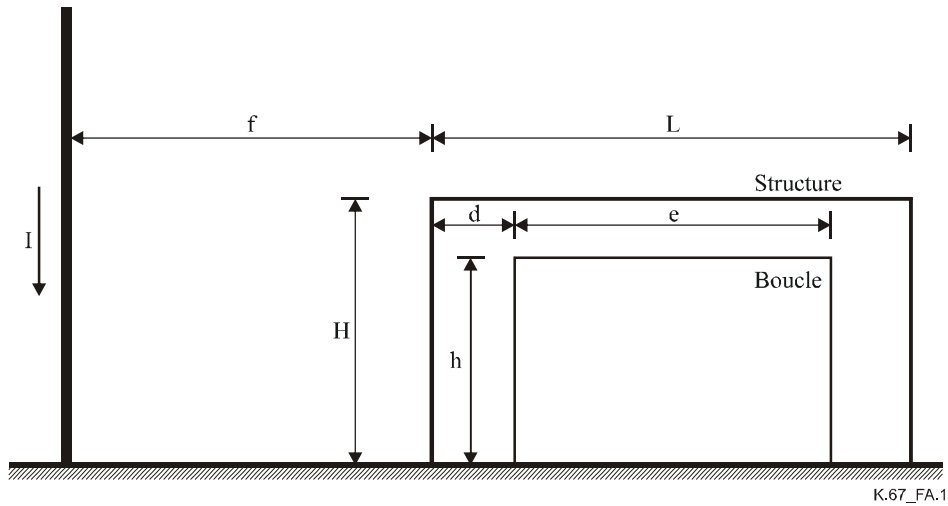


Figure A.1/K.67 – Décharges proches de l'immeuble

L'intensité en court-circuit (I_{sc}), si l'on néglige la résistance ohmique des câbles (cas le plus défavorable), est évaluée au moyen des équations (5) ou (6), où l'inductance propre L_S , en μH , de la boucle est calculée à partir de l'équation suivante:

$$L_S = 0,8 \times \sqrt{e^2 + h^2} - 0,8 \times (e + h) + 0,4 \times e \times \ln \left[\frac{\frac{2 \times h}{r}}{e + \sqrt{e + \left(\frac{h}{e}\right)^2}} \right] + 0,4 \times h \times \ln \left[\frac{\frac{2 \times e}{r}}{e + \sqrt{e + \left(\frac{e}{h}\right)^2}} \right] \quad (A.2)$$

où:

r est le rayon du câble en boucle [m]

Les surtensions dangereuses escomptées, induites dans la boucle interne sont obtenues à l'aide de l'équation (4).

Le niveau SPL est défini comme suit:

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)} \quad (A.3)$$

où:

U_{SPL} est la tension correspondante au niveau SPL choisi

U_R est une tension de référence (inférieure à la tension U_{SPL}) qui définit le niveau de tension, pour une résistance minimale, de l'équipement relié à la ligne ou de l'isolation du conducteur de la ligne

$N_T(U)$ est le nombre total d'impacts qui induisent une tension égale ou supérieure à U

Le nombre total d'impacts $N_T(U)$ se calcule au moyen de la formule suivante (voir Figure A.2):

$$N_T = 4 \cdot N_g \int_{R \text{ o } I}^{\infty} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\infty} p(i) \cdot di \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot x \cdot dx \quad (A.4)$$

où:

N_g est la densité des éclairs au sol (nombre d'impacts/km² . an)

R est la distance minimale à compter de la boucle, pour laquelle la foudre ne frappe pas directement l'immeuble ($R \cong 3H + L/2$) (voir Figure A.1)

$p(i)$ est la fonction de probabilité pour que l'intensité au point d'impact soit i

NOTE 1 – Comme indiqué dans la Rec. UIT-T K.47, $p(i) = 10^{-2} e^{-(a-bi)}$ pour $i \geq 0$, où " i " est l'intensité de crête de la décharge [kA], tandis que $a = 4,605$ et $b = 0,0117$ pour $i \leq 20$ kA et que $a = 5,063$ et $b = 0,0346$ pour $i > 20$ kA.

θ est l'angle entre la boucle et une ligne droite reliant le point d'impact au centre de la boucle

x est la distance entre le point d'impact et le centre de la boucle

I_p est l'intensité de crête au point d'impact, qui induit dans la boucle la tension U déduite de l'équation (4)

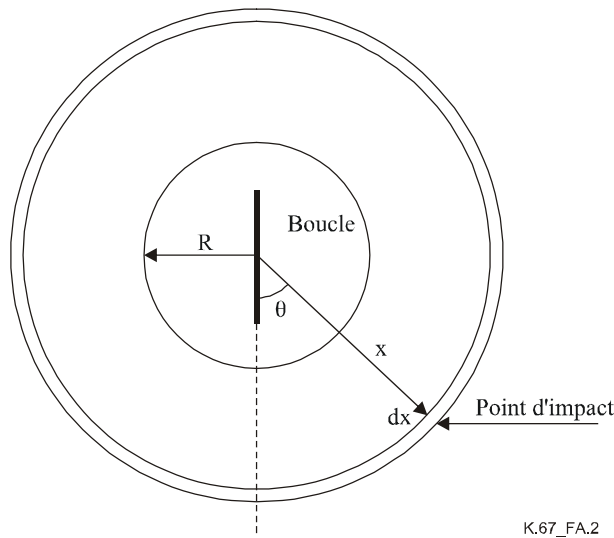


Figure A.2/K.67 – Configuration de référence pour l'évaluation des surtensions/surintensités induites dans une boucle par une décharge proche d'un immeuble

En supposant que la plupart des points d'impacts sont situés à une certaine distance de l'immeuble de manière que $f+d \gg e$ et, donc, $\ln [(f+d+e)/(f+d)] \cong e/(f+d)$, l'équation (A.1) peut être réécrite sous la forme suivante:

$$L_M = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times \frac{e}{(f+d)} \cong \frac{W}{x} \quad (\text{A.5})$$

où $x \cong f+d$ et W est une constante obtenue comme suit:

$$W = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times e \quad (\text{A.6})$$

Après avoir résolu les intégrales de l'équation (A.4), inséré les résultats dans l'équation (A.3) et effectué quelques opérations arithmétiques, on obtient les équations suivantes:

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_1 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_{SPL}) - D]}{[(C_1 \cdot U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_R) - D]} \quad \text{pour } U_R \text{ et } U_{SPL} \leq U_{LIM} \quad (A.7)$$

$$SPL = \left(\frac{b_1 \cdot U_R}{b_2 \cdot U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_{SPL})]}{[(C_1 \cdot U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_R) - D]} \quad \text{pour } U_R \leq U_{LIM} \text{ et } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.8)$$

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_{SPL})]}{[(C_2 \cdot U_R + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_R)]} \quad \text{pour } U_R \text{ et } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.9)$$

NOTE 2 – Ces trois équations (A.7), (A.8) et (A.9), au lieu d'une seulement, résultent de la discontinuité de la fonction $p(i)$ en $i = 20$ kA (voir NOTE 1);

où:

$$U_{LIM} = \frac{20 \cdot W}{R \cdot T_1} \quad (A.10)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \cdot R \cdot T_1}{W} \quad (A.11)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \cdot R \cdot T_1}{W} \quad (A.12)$$

$$D = \left(1 + 20b_1 - 20 \frac{b_1^2}{b_2} - \frac{b_1^2}{b_2^2} \right) \exp(a_1 - 20b_1) = 82,33 \quad (A.13)$$

$a_1 = 4,605$; $b_1 = 0,0117$; $a_2 = 5,063$; et $b_2 = 0,0346$ sont les paramètres de la fonction $p(i)$.

Dans les équations (A.7) à (A.9), les tensions U_{SPL} et U_R sont exprimées en kV.

Un cas limite pour le niveau SPL est obtenu lorsque $R \rightarrow 0$. Dans ce cas, les équations (A.7) à (A.9) se réduisent à la forme simple de l'équation (A.14), où la tension U_{SPL} est indépendante des dimensions de la boucle et des paramètres de la fonction $p(i)$.

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \quad (A.14)$$

Dans les Tableaux A.1 et A.2 sont présentées les valeurs de la tension U_{SPL} obtenues au moyen des équations (A.7) à (A.9) pour différentes valeurs des niveaux SPL, des tensions U_R et des dimensions de boucle et d'immeuble,.

Le même raisonnement s'applique pour obtenir les intensités en court-circuit induites dans la boucle. Les équations qui en découlent sont semblables aux équations (A.7) à (A.9), mais les tensions U_R , U_{SPL} et U_{LIM} sont remplacées par les intensités I_R , I_{SPL} et I_{LIM} . Les équations (A.10) à (A.12) sont, quant à elles, modifiées comme suit:

$$I_{LIM} = \frac{20 \times W}{R \times L_S} \quad (A.15)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \times R \times L_S}{W} \quad (A.16)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \times R \times L_s}{W} \quad (\text{A.17})$$

Lors du calcul des valeurs des Tableaux A.1 et A.2, on a supposé que la fonction $p(i)$ s'appliquait à la première décharge. Comme indiqué dans le Tableau 1, la distribution de la décharge suivante est la même, mais les intensités sont divisées par 4 (c'est-à-dire 200 kA pour la première décharge correspondent à 50 kA pour la décharge suivante et ainsi de suite). En conséquence, puisque la fonction $p(i)$ a été employée pour obtenir les équations (A.7) à (A.9), le temps de montée de la décharge suivante, utilisé dans le calcul de la tension U_{SPL} , a été multiplié par 4, c'est-à-dire $T_1 = 1 \mu s$, afin de compenser pour la différence d'amplitude des intensités. Les valeurs de la tension U_{SPL} et de l'intensité I_{SPL} ont été calculées pour la décharge suivante et pour la première décharge, respectivement.

Tableau A.1/K.67 – Valeurs crête des surtensions et des surintensités induites par une décharge proche d'un immeuble dans une boucle de 25 m² située à l'intérieur de celui-ci

Niveau SPL	Dimensions de l'immeuble (m)					
	L = 25 – H = 50 (grand bâtiment)		L = 15 – H = 5 (petit bâtiment)		L = 0 – H = 0 (pas de bâtiment)	
	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)
I	2520	61	4630	112	5000	121
II	2100	51	3390	82	3540	86
III/IV	1610	39	2200	53	2240	54
NOTE – Conditions de calcul: $h = 2,5$ m; $e = 10$ m; $r = 0,5$ mm ($L_s = 41,2 \mu H$); $\eta = 1$; $K_s = 1$.						

Tableau A.2/K.67 – Valeurs crête des surtensions et des surintensités induites par une décharge proche d'un immeuble dans une boucle de 50 m² située à l'intérieur de celui-ci

Niveau SPL	Dimensions de l'immeuble (m)					
	L = 25 – H = 50 (grand bâtiment)		L = 15 – H = 5 (petit bâtiment)		L = 0 – H = 0 (pas de bâtiment)	
	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)
I	3370	64	4890	93	5000	95
II	2690	51	3500	67	3540	68
III/IV	1920	37	2230	43	2240	43
NOTE – Conditions de calcul: $h = 5$ m; $e = 10$ m; $r = 0,5$ mm ($L_s = 52,4 \mu H$); $\eta = 1$; $K_s = 1$.						

Les valeurs de l'inductance L_s pour différentes dimensions de boucle peuvent être calculées au moyen de l'équation (A.2). Dans le Tableau A.3 sont donnés quelques résultats ainsi obtenus.

Tableau A.3/K.67 – Valeurs de l'inductance (L_s) exprimée en μH pour différentes dimensions de boucle

h (m)	e = 20 m		e = 10 m	
	r = 0,5 mm	r = 5 mm	r = 0,5 mm	r = 5 mm
2,5	75,3	54,6	41,2	29,7
0,5	56,4	37,5	28,7	19,1
0,05	36,9	18,4	18,5	9,2
0,025	31,3	12,9	15,7	6,4

A.3 Foudre sur l'immeuble

Dans le cas de la foudre sur l'immeuble, on peut considérer les trois cas suivants:

- 1) l'immeuble est protégé par un parafoudre (système de protection contre la foudre (LPS) constitué d'une seule tige (par exemple, un pylône d'antenne protégeant la station de base radioélectrique (RBS, *radio base station*) proche);
- 2) l'immeuble est protégé par un parafoudre à mailles muni de conducteurs de descente répartis le long du périmètre;
- 3) l'immeuble est protégé par un blindage spatial de type grille (parafoudre) avec une largeur des mailles $w \leq 5$ m.

Dans les deux premiers cas, la tension à vide (V_{io}) induite dans la boucle à l'intérieur de l'immeuble peut être évaluée à l'aide de l'équation (4), l'inductance mutuelle L_M étant obtenue à partir de l'équation suivante [4, 6]:

$$L_M = 0,2 \times K_c \times K_s \times h \times \ln\left(\frac{d+e}{d}\right) [\mu\text{H}] \quad (\text{A.18})$$

où (voir Figure A.3):

- h hauteur de la boucle [m]
- e longueur de la boucle [m]
- d distance entre les conducteurs de descente et le circuit en boucle [m]
- K_c facteur tenant compte de la répartition du courant entre les conducteurs de descente
- K_s facteur d'écran tenant compte de l'effet du blindage du câble

et:

I_{ps} valeur crête des décharges suivantes (Tableau 1) [kA]

$T_1 = 0,25$ temps de montée des décharges suivantes (Tableau 1) [μs]

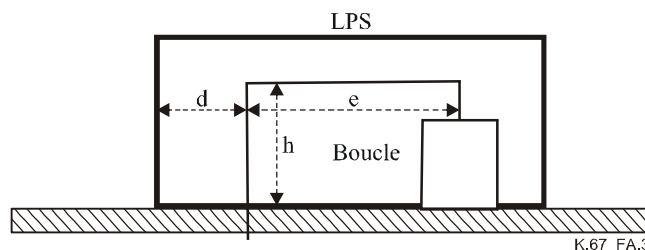


Figure A.3/K.67 – Décharges sur l'immeuble: parafoudre avec un ou plusieurs conducteurs de descente

Dans le cas d'un parafoudre avec un conducteur de descente, on suppose que le facteur $K_c = 1$; dans le cas d'un parafoudre avec plusieurs conducteurs de descente, on a l'équation suivante [6]:

$$K_c = \frac{1}{2 \times n} + 0,3 \quad (\text{A.19})$$

où:

n est le nombre de conducteurs de descente répartis régulièrement le long du périmètre

Dans le troisième cas, lorsque l'immeuble est protégé contre la foudre par un blindage spatial de type grille, la valeur crête de la tension à vide induite dans la boucle peut être calculée à l'aide de l'équation (4) où l'inductance mutuelle L_M se calcule à partir de l'équation suivante [6]:

$$L_M = 0,4 \times \pi \times K_s \times h \times \ln\left(\frac{d_w + e}{d_r}\right) \times K_h \times \frac{w}{\sqrt{d_r}} \quad [\mu\text{H}] \quad (\text{A.20})$$

où (voir Figure A.4):

d_w distance de la boucle au mur [m]

d_r distance de la boucle au toit [m]

K_h facteur de configuration égal à $0,01[1/\text{m}^{0,5}]$

K_s facteur d'écran tenant compte de l'effet du blindage du câble

et:

I_{ps} valeur crête des décharges suivantes (Tableau 1) [kA]

$T_1 = 0,25$ temps de montée des décharges suivantes (Tableau 1) [μs]

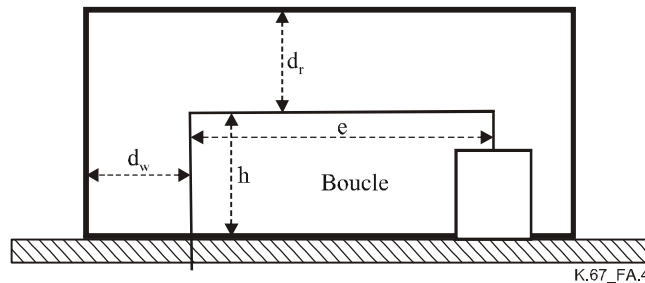


Figure A.4/K.67 – Décharges sur l'immeuble: blindage spatial de type grille

L'intensité en court-circuit (I_{sc}), si l'on néglige la résistance ohmique des câbles (cas le plus défavorable), est évaluée au moyen des équations (5) ou (6) où l'inductance propre L_S , en H, de la boucle est calculée à partir de l'équation (A.2).

Les valeurs de la tension V_{oi} et de l'intensité I_{sc} , dues à la première décharge et aux décharges suivantes, sont données dans le Tableau A.4, en fonction du niveau LPL, en supposant que l'immeuble est protégé par un parafoudre constitué d'une seule tige ($K_c = 1$, cas le plus défavorable), que le câblage intérieur n'est pas blindé et que la dimension de la boucle soumise à l'induction est de 50 m^2 ($h = 5 \text{ m}$; $e = 10 \text{ m}$).

Tableau A.4/K.67 – Valeurs crête des surtensions/surintensités induites par une décharge sur un immeuble dans une boucle de 50 m² à l'intérieur de celui-ci

Niveau LPL	Premières décharges		Décharges suivantes	
	V _{oi} [kV]	I _{sc} [kA]	V _{oi} [kV]	I _{sc} [kA]
I	25	6	250	1,5
II	19	4,5	190	1,2
III/IV	12,5	3	125	0,8
NOTE – Conditions de calcul: L _S = 42 µH ; L _M = 0,792 µH; dimensions de la boucle 50 m ² (h = 5 m; e = 10 m); K _c = 1; K _s = 1; d = 4 m ; r = 0,5 m.				

Annexe B

Surintensités sur la ligne de télécommunication induites par la foudre proche de la ligne: sol parfaitement conducteur

Le nombre de décharges sur la section élémentaire " $L_r \times dx$ ", induisant une tension égale ou supérieure à U sur la ligne de télécommunication, est obtenu au moyen de l'équation suivante:

$$N = 2 \times L_r \times N_g \times dx \int_I^{\infty} p(i) \times di \quad (B.1)$$

où N_g est la densité des éclairs au sol, L_r est la longueur de la ligne, $p(i)$ est la fonction de probabilité pour que l'intensité au point d'impact soit i (telle qu'elle est obtenue dans les Recommandations UIT-T K.25, K.47 et dans la CEI 61663-1) et I est l'intensité de crête au point d'impact, qui induit la tension U au point donné de la ligne.

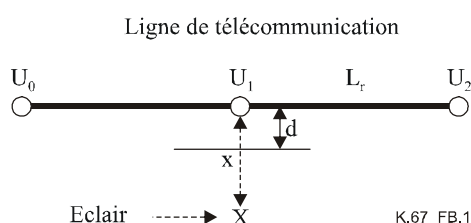


Figure B.1/K.67 – Configuration de référence pour une évaluation des surtensions/surintensités induites par la foudre proche de la ligne

Le nombre total d'impacts qui induisent une tension égale ou supérieure à U se calcule à l'aide de la formule suivante:

$$N_T = 2 \times L_r \times N_g \int_d^{\infty} \int_I^{\infty} p(i) \cdot di \cdot dx \quad (B.2)$$

où d est la distance minimale à compter de la ligne, pour laquelle il n'y a pas d'impact sur la ligne. On suppose que l'on a approximativement $d = 3 h$ (Figure B.1).

La valeur crête de la tension U_1 au milieu de la ligne et les tensions U_0 ou U_2 , aux extrémités de la ligne peuvent être évaluées au moyen des équations suivantes en supposant que le sol est parfaitement conducteur:

$$U_1 = \frac{30 \times I_p \times h}{d} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \right) \quad (\text{B.3})$$

$$U_0 = U_2 = \frac{30 \times I_p \times h}{d} \quad (\text{B.4})$$

où:

I_p est la valeur crête (exprimée en kA) de l'intensité de la décharge

v est le rapport de la vitesse de la décharge en retour (on suppose $v = 1,3 \times 10^8$ m/s) à la vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8$ m/s):

$$v = 0,43 \text{ et } \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \right) = 1,3$$

Après avoir remplacé l'intensité " I_p " dans l'équation (B.2) par la valeur qui est obtenue au moyen de l'équation (B.4), après avoir résolu les intégrales, inséré les résultats dans l'équation (15) et effectué manipulations algébriques, on obtient les équations suivantes:

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_1 - A_1 U_0) - B]}{U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]} \quad \text{pour } U_R \text{ et } U_0 \leq U_{LIM} \quad (\text{B.5})$$

$$SPL = \frac{b_1 U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{b_2 U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]} \quad \text{pour } U_0 > U_{LIM} \text{ et } U_R \leq U_{LIM} \quad (\text{B.6})$$

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{U_{SPL} [\exp(a_2 - A_2 U_R)]} \quad \text{pour } U_0 > U_{LIM} \text{ et } U_R > U_{LIM} \quad (\text{B.7})$$

NOTE 1 – Ces trois équations (B.5), (B.6) et (B.7), au lieu d'une seulement, résultent de la discontinuité de la fonction $p(i)$ en $i = 20$ kA.

où:

η est le facteur d'écran de la ligne ($\eta = 1$ lorsque la ligne n'est pas blindée)

$$U_{LIM} = 600 h \eta / d \quad (\text{B.8})$$

$$A_1 = \frac{b_1}{10\eta} = \frac{0,00117}{\eta} \quad (\text{B.9})$$

$$A_2 = \frac{b_2}{10\eta} = \frac{0,00346}{\eta} \quad (\text{B.10})$$

$$B = \left(1 - \frac{b_1}{b_2} \right) \exp(a_1 - 20b_1) = 52,37 \quad (\text{B.11})$$

$a_1 = 4,605$; $b_1 = 0,0117$; $a_2 = 5,063$; et $b_2 = 0,0346$ sont les paramètres de la fonction $p(i)$.

Dans les équations (B.5) à (B.7), les tensions U_{SPL} et U_R sont exprimées en kV.

Un cas limite pour le niveau SPL est obtenu pour $d \rightarrow 0$. Dans ce cas, les équations (B.5) à (B.7) se réduisent à la forme simple de l'équation (B.12), où la tension U_{SPL} est indépendante des caractéristiques de la ligne et des paramètres de la fonction $p(i)$.

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right) \quad (B.12)$$

Le Tableau B.1 donne, en fonction des valeurs du niveau SPL et de la tension U_R , les valeurs de la tension U_{SPL} , obtenues à l'aide de l'équation (B.5) pour une ligne aérienne non blindée ($\eta = 1$).

Tableau B.1/K.67 – Valeurs à vide de la surtension dangereuse (U_{SPL}) aux extrémités d'une ligne aérienne non blindée en fonction du niveau SPL pour différentes valeurs de la tension de référence U_R

U_R (kV)	Surtension dangereuse U_{SPL} [kV]		
	Niveau SPL		
	0,01	0,02	0,05
1,5	111	64	28
1,0	81	44	19
0,75	64	34	14
0,5	44	23	10
0,25	23	12	5

Dans le Tableau B.1, on a fixé la limite inférieure des tensions à vide "dangereuses" à deux fois la valeur de la tension de référence ($2 \times U_R$), afin de tenir compte de la réflexion au niveau de la terminaison de la ligne. Par exemple, si la tension $U_R = 0,75$ kV et le niveau SPL = 0,01, alors 1% des tensions induites à vide supérieures à 1,5 kV sera supérieur ou égal à 64 kV.

La valeur crête de l'intensité en court-circuit (I_{sc}) est évaluée comme suit:

$$I_{sc} = \frac{U_{SPL}}{Z} \quad (B.13)$$

où:

$Z = 400 \Omega$ est l'impédance de décharge de la ligne aérienne

Pour une ligne aérienne blindée, les valeurs de la tension U_{SPL} peuvent être calculées en suivant la même méthode que celle décrite ci-dessus, après que le facteur d'écran a été évalué et employé dans les équations (B.9) et (B.10). Toutefois, la probabilité absolue d'occurrences (nombres de décharges par an) pour la tension résultante U_{SPL} sera beaucoup plus faible que celle de la tension U_{SPL} correspondante pour la ligne non blindée. Il est donc plus sensé, en vue d'obtenir la tension U_{SPL} de la ligne blindée, de multiplier la tension U_{SPL} de la ligne non blindée par le facteur d'écran.

NOTE 2 – Par exemple, si le niveau est le niveau SPL II, alors, parmi toutes les tensions supérieures à 0,75 kV observées sur une ligne non blindée pendant une certaine période, 2% des tensions sont égales ou supérieures à 34 kV, pourcentage qui correspond à N_T décharges. Donc, pour une ligne blindée ($\eta_e = 0,1$) et le même niveau SPL II, N_T décharges seront, pendant la même période, égales ou supérieures à 3,4 kV. Il convient toutefois de noter que parmi toutes les tensions supérieures à 0,75 kV observées sur cette ligne blindée pendant cette période, plus de 2% des tensions sont égales ou supérieures à 3,4 kV.

Les valeurs résultantes ont été insérées dans le Tableau 5, compte tenu du facteur d'écran, à savoir celui correspondant au blindage ($\eta_s = 0,05$) pour les nœuds L, E, P et C et celui correspondant à la terre ($\eta_e = 0,1$) pour les nœuds D, S et I.

NOTE 3 – Le facteur d'écran lié au blindage a été évalué en supposant une résistance de blindage (R_s) de 5Ω , puis en calculant $\eta_s = R_s/Z = 5/100 = 0,05$. Le facteur d'écran lié à la terre a été évalué en supposant une résistance de terre R_e d'environ 40Ω , puis en calculant $\eta_e = (R_s + R_e)/(Z + R_e) = 45/440 = 0,1$.

Le Tableau B.2 donne, en fonction des valeurs du niveau SPL et de la tension U_R , les valeurs de la tension U_{SPL} , obtenues pour une ligne aérienne blindée ($\eta = 0,1$) à l'aide du raisonnement décrit ci-dessus.

Tableau B.2/K.67 – Valeurs à vide de la surtension dangereuse (U_{SPL}) aux extrémités d'une ligne aérienne blindée en fonction du niveau SPL pour différentes valeurs de la tension de référence U_R

U_R (kV)	Surtension dangereuse U_{SPL} [kV]		
	Niveau SPL		
	0,01	0,02	0,05
1,5	11	6,4	2,8
1,0	8,1	4,4	1,9
0,75	6,4	3,4	1,4
0,5	4,4	2,3	1,0
0,25	2,3	1,2	0,5

La valeur crête de l'intensité en court-circuit (I_{sc}) a pu être évaluée au moyen de l'équation (B.13), où Z , de valeur égale à 50Ω ou 100Ω , est l'impédance de décharge du circuit de blindage du conducteur ou du circuit de terre du conducteur, respectivement, ces deux grandeurs ayant été mesurées expérimentalement.

Appendice I

Surintensités à l'intérieur d'un immeuble induites par la foudre proche de l'immeuble ou sur celui-ci: dispositif expérimental et résultats

I.1 Introduction

Le présent appendice vise à confirmer l'hypothèse que la forme d'onde de la tension induite par la décharge dans une boucle ouverte a un temps de montée et une durée très courts et que la forme d'onde de l'intensité induite par la décharge dans une boucle fermée est identique à celle de l'intensité de la décharge elle-même. Pour ce faire, on s'est aidé des données expérimentales recueillies sur le site d'essai de déclenchement de la foudre de Cachoeira Paulista au Brésil.

I.2 Modèle théorique

On fait les hypothèses suivantes:

- la boucle est relativement proche du canal de décharge, de sorte que le courant puisse être considéré comme étant uniforme le long du canal (cette hypothèse permet de négliger les effets de propagation du courant de décharge le long du canal);
- la terre est un conducteur parfait, de manière que le principe de l'image miroir puisse être appliquée au canal de décharge sous la surface de la terre;

- l'effet des conducteurs métalliques (par exemple, les lignes électriques) qui sont susceptibles d'acheminer une partie du courant de décharge est négligé, c'est-à-dire la distribution de courant est symétrique par rapport à la surface de la terre et on peut employer le principe de l'image miroir;
- la boucle a une résistance qui est faible comparée à sa réactance inductive aux fréquences associées aux courants de décharge (ceci est valable dans la plupart des cas);
- tout effet d'écran autour de la boucle est négligé;
- toute déviation par rapport à la verticale du canal de décharge est négligée;
- la boucle et le canal de décharge sont dans le même plan (ceci est une hypothèse prudente pour l'amplitude de l'intensité, qui n'affecte toutefois pas la durée).

Le courant de décharge (I_a) se propage donc uniformément le long d'une ligne droite verticale (voir Figure I.1). Le champ d'induction magnétique (B) qu'il produit s'écrit sous la forme suivante:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_a}{2 \times \pi \times x} \quad (I.1)$$

où:

x est la distance jusqu'au canal de décharge

Le flux magnétique dans la boucle s'obtient aisément en intégrant le champ magnétique le long de la boucle

$$\Phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0}{2 \times \pi} \int_f^{f+e} \frac{dx}{x} \quad (I.2)$$

ce qui conduit au résultat suivant:

$$\Phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (I.3)$$

La tension de commande induite (V) dans la boucle est déduite à partir de la dérivée par rapport au temps du flux magnétique:

$$V = \frac{\left(\frac{dI_a}{dt}\right) \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (I.4)$$

L'équation (I.4) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$V = L_M \times \left(\frac{dI_a}{dt}\right) \quad (I.5)$$

où:

L_M est l'inductance mutuelle entre le canal de décharge et la boucle, qui est obtenue au moyen de la formule suivante:

$$L_M = \frac{h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} = 0,2 \times h \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right) \quad \text{en } \mu\text{H} \quad (I.6)$$

L'intensité induite I_{boucle} s'exprime au moyen de la formule suivante:

$$I_{\text{boucle}} = \left(\frac{1}{L_S} \right) \int V dt = \left(\frac{L_M}{L_S} \right) \times I_a \quad (1.7)$$

où:

L_S est l'inductance propre de la boucle

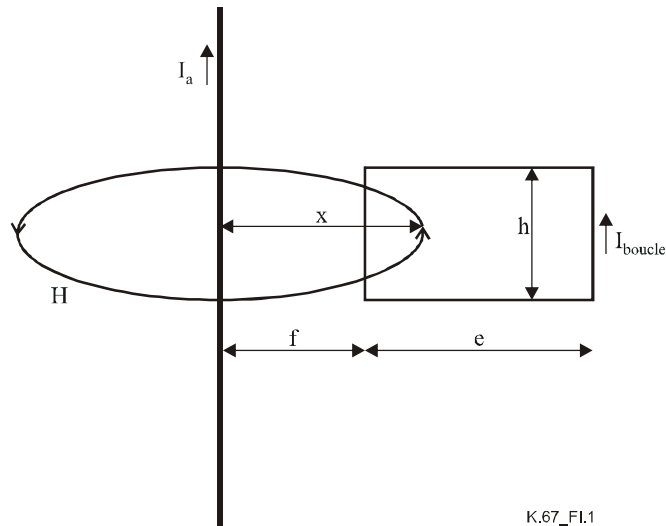


Figure I.1/K.67 – Induction dans une boucle

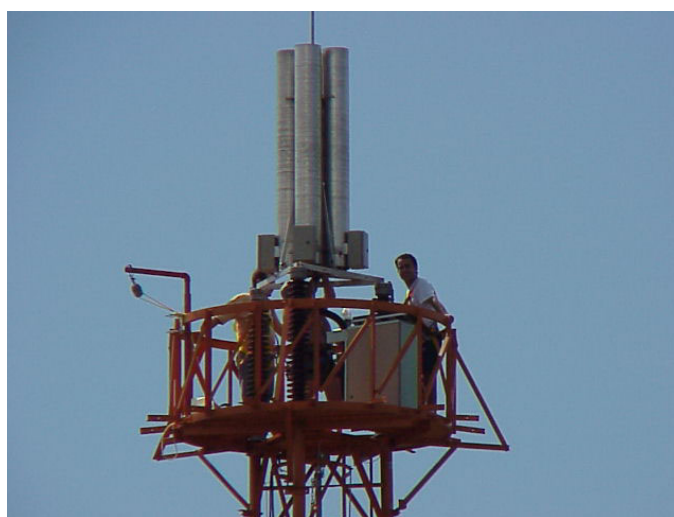
I.3 Site expérimental et dispositif d'essai

I.3.1 Site expérimental

La station du site d'essai est illustrée dans la Figure I.2a. Le sommet du pylône est équipé d'une plate-forme de lancement de roquettes employées pour déclencher des décharges. Une vue rapprochée en est donnée dans la Figure I.2b. La plate-forme est soutenue par des matériaux isolants et reliée au bâtiment par un unique conducteur qui passe à travers une sonde de courant Pearson (type 1330) et aboutit dans un oscilloscope placé dans l'enceinte métallique proche. L'oscilloscope est télécommandé par une interface RS232 à l'aide de fibres optiques. On peut ainsi mesurer directement l'intensité de la décharge.



a) Station RBS sur le site d'essai



b) Sommet du pylône

Figure I.2/K.67 – Station RBS sur le site d'essai

I.3.2 Dispositif d'essai destiné à la mesure de la tension induite dans une boucle ouverte

Le dispositif expérimental est représenté dans la Figure I.3. La foudre est déclenchée et enregistrée au sommet du pylône de télécommunication. La tension induite est mesurée dans une boucle placée à la distance f du pylône. Les dimensions du dispositif sont les suivantes:

- dimensions de la boucle: $e = 1,5$ m et $h = 2,0$ m (aire de la boucle = 3 m²);
- distance entre la boucle et la foudre: $f = 100$ m.

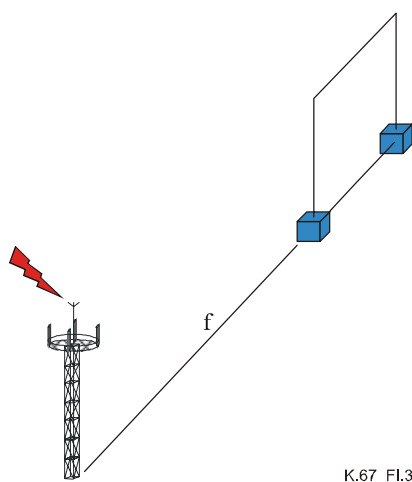


Figure I.3/K.67 – Dispositif d'essai destiné à la mesure de la tension induite dans une boucle ouverte

L'intensité de la décharge mesurée est représentée dans la Figure I.4 et ses principaux paramètres se résument aux paramètres suivants:

- intensité: temps de montée (T) = $0,375$ ms;
- valeur crête (I_s) = $9,8$ kA.

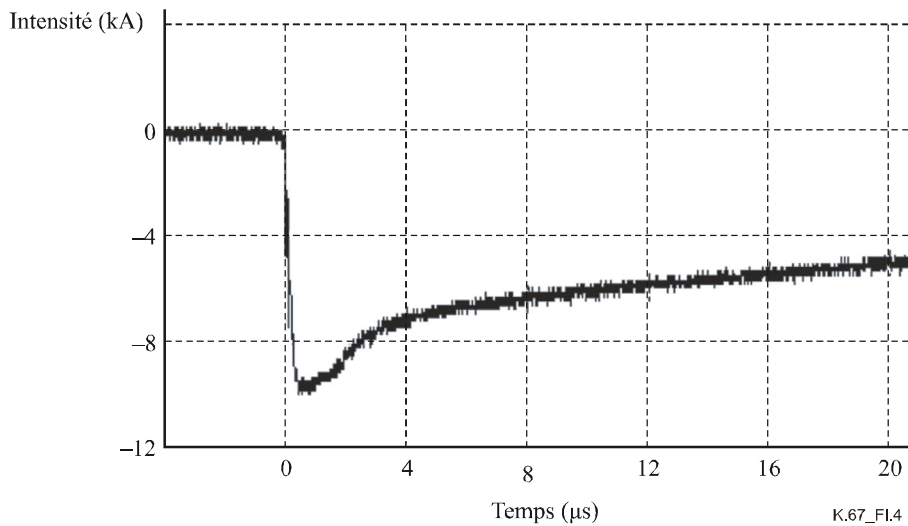
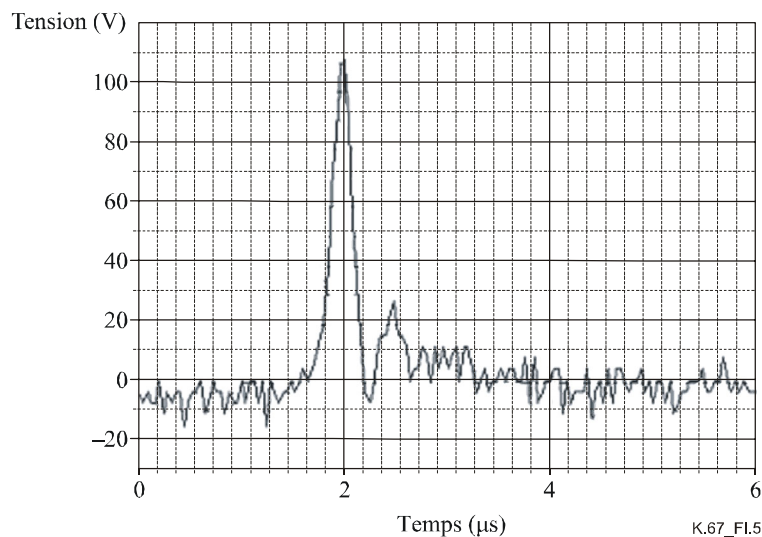


Figure I.4/K.67 – Intensité de la décharge déclenchée

La tension induite mesurée dans la boucle est représentée dans la Figure I.5. On peut y observer que le temps de montée de la tension induite dans un circuit ouvert est semblable à celui de l'intensité induite (à savoir, 0,35 μs) et que sa durée est de l'ordre de quelques μs.



(L'échelle de temps est différente de celle de la Figure I.4.)

Figure I.5/K.67 – Tension induite mesurée dans une boucle

En insérant les valeurs numériques dans l'équation (I.4) et en supposant que la forme d'onde de l'intensité est trapézoïdale, nous obtenons une onde rectangulaire d'une durée de 0,375 μs et d'une valeur crête de 157 V. Cette valeur est à comparer à celle de la Figure I.5, où l'on observe qu'elle est un peu supérieure à la valeur mesurée (110 V).

On peut employer une méthode plus sophistiquée, fondée sur les travaux de Rusck [I.1]. Ce modèle tient compte de la propagation du courant le long du canal de décharge. Soit les équations de Rusck pour le champ d'induction magnétique (B) à une certaine distance de la foudre. En prenant les dérivées par rapport au temps du champ B, nous obtenons les équations suivantes:

$$\frac{dB}{dt} = 0 \quad \text{pour } t \leq r_0/v_0 \quad (\text{I.8})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0 t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t \right\} \quad \text{pour } r_0/v_0 \leq t \leq r_0/v_0 + T \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0 t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t - \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0 (t-T)}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} (t-T) \right\} \quad (\text{I.10})$$

pour $t \geq r_0/v_0 + T$

Dans les équations (I.9) et (I.10), v_0 est la vitesse de la lumière dans le vide (3×10^8 m/s) et v est la vitesse de propagation du courant de la décharge, qui est supposée être égale à $1,3 \times 10^8$ m/s. En insérant les valeurs numériques dans ces équations, nous obtenons la forme d'onde représentée dans la Figure I.6. La valeur crête est de 112 V, en excellent accord avec la tension mesurée.

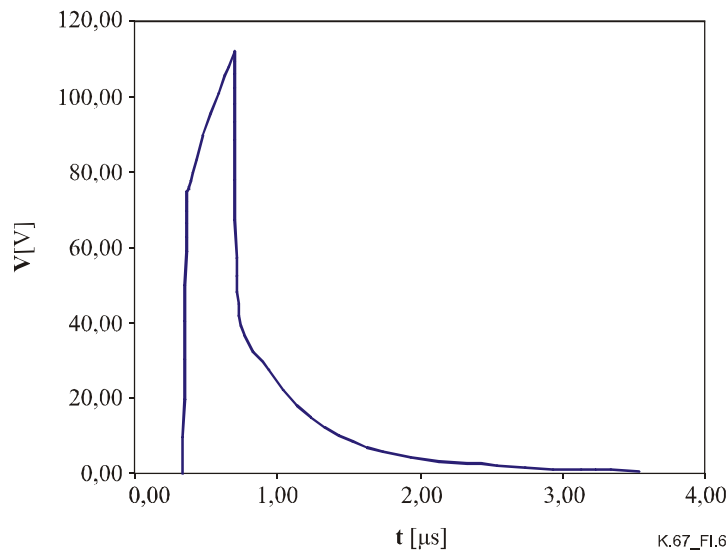
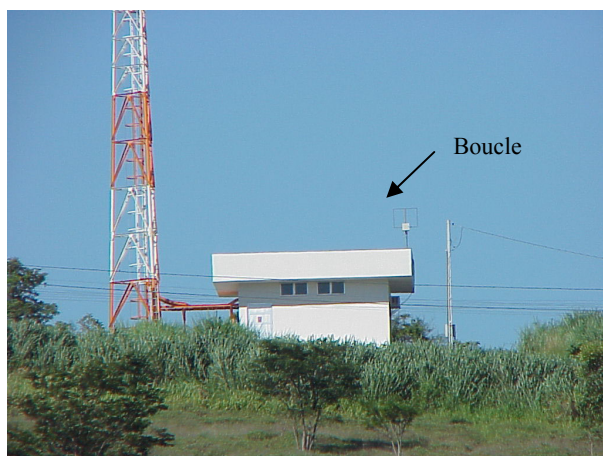


Figure I.6/K.67 – Onde de tension calculée au moyen du modèle de Rusck

Les équations (I.9) et (I.10) permettent de conclure que, pour des boucles relativement proches du point d'impact ($f < T v_0$), on obtient une approximation acceptable de la valeur crête de la tension induite en supposant que le courant de la décharge est uniforme le long du canal, conformément à l'équation (I.4). Mais si la boucle est éloignée du point d'impact, la tension induite diminue progressivement par rapport à la valeur calculée au moyen de l'équation (I.4), parce que la vitesse de propagation du courant prend de l'importance. Dans ce cas, il faudrait employer les équations (I.8) à (I.10).

I.3.3 Dispositif d'essai destiné à la mesure l'intensité induite dans une boucle fermée

Dans la Figure I.7a est donnée une image plus rapprochée de la station RBS, où l'on distingue une boucle sur le toit du bâtiment. Cette boucle est constituée d'un tube en cuivre en court-circuit et son intensité est mesurée à l'aide d'une sonde de courant Pearson (type 110) relié à un oscilloscope à l'intérieur du bâtiment de la station RBS. Dans la Figure I.7b est représentée une décharge déclenchée au sommet du pylône, telle qu'elle est observée à partir d'un abri de contrôle.



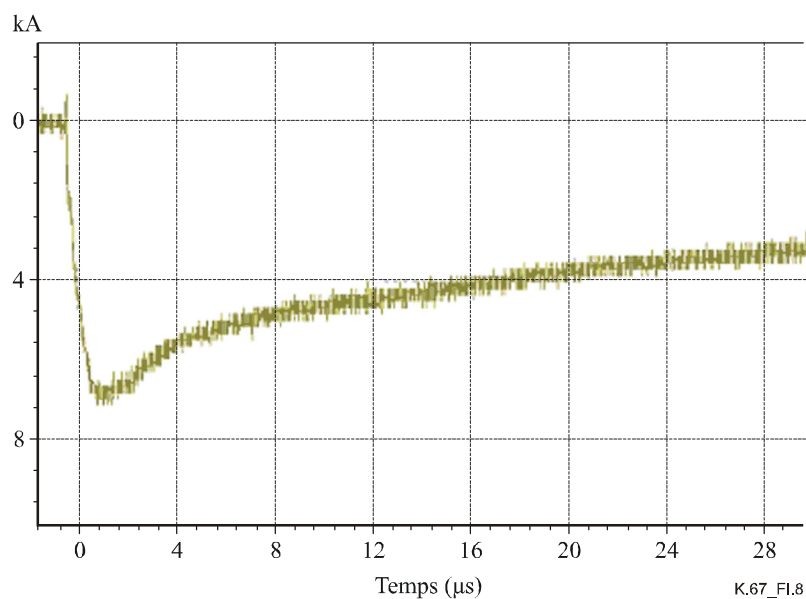
a) Station RBS équipée d'une boucle



b) Décharge déclenchée

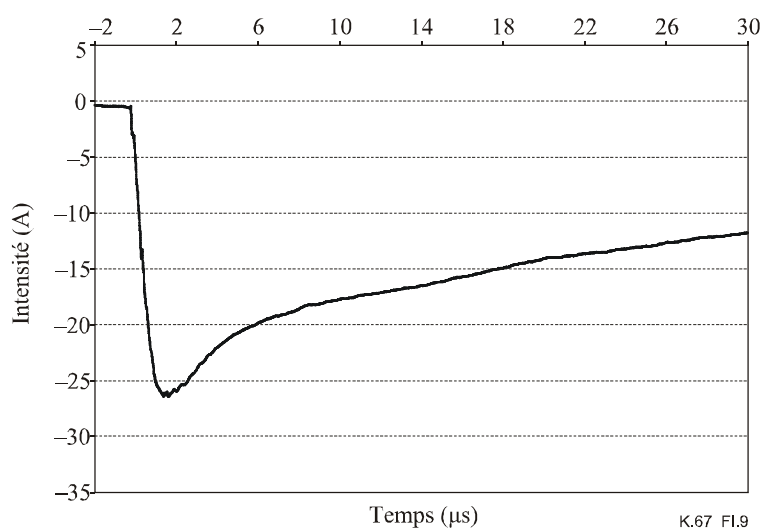
Figure I.7/K.67 – Dispositif d'essai destiné à la mesure de l'intensité induite dans une boucle fermée

Les ondes enregistrées simultanément au sommet du pylône (Figure I.8) et au niveau de la boucle (Figure I.9) sont caractérisées par la valeur crête, le temps de décroissance à mi-valeur (T_h) et le temps de montée (T_f), par définition égal à $1,25 (T_{90\%} - T_{10\%})$.



Courant 19/02/2005 – Bloc 1 – Sommet du pylône
Crête = 7,4 kA – $T_h = 24 \mu s$ – $T_f = 1,2 \mu s$

Figure I.8/K.67 – Intensité de la décharge



Courant 19/02/2005 – Bloc 1 – Boucle
Crête = 26,4 A – $T_h = 24 \mu s$ – $T_f = 1,3 \mu s$

Figure I.9/K.67 – Intensité induite dans la boucle fermée

La comparaison entre les ondes enregistrées au sommet du pylône et au niveau de la boucle indique qu'il y a un très bon accord en ce qui concerne la forme d'onde.

Les données relatives au site d'essai sont les suivantes:

- distance entre l'axe du pylône et la boucle: $f = 10,7 \text{ m}$;
- hauteur de la boucle: $h = 0,80 \text{ m}$;
- largeur de la boucle: $e = 1,00 \text{ m}$;
- rayon du conducteur en boucle = $0,0075 \text{ m}$.

L'inductance mutuelle entre le pylône et la boucle, obtenue à partir de l'équation (I.6), est la suivante:

$$L_M = 0,0143 \mu H$$

L'inductance propre de la boucle, calculée à l'aide de l'équation (A.2), est la suivante:

$$L_S = 2,89 \mu H$$

L'intensité escomptée dans la boucle, obtenue à partir de l'équation (I.7), pour une intensité de la décharge $I_a = 7,04 \text{ kA}$, est la suivante :

$$I_{boucle} = 34,8 \text{ A}$$

L'intensité mesurée dans la boucle (26,4 A) est un peu inférieure (de 24%) à la valeur escomptée parce que les conditions réelles sur le site d'essai ne satisfont pas entièrement aux hypothèses théoriques énumérées dans le § I.2. Parmi ces conditions, celle qui a contribué le plus à ce désaccord est la présence de la ligne électrique qui éloigne de la station une partie du courant de décharge, dans une direction telle qu'il n'y a pas couplage avec la boucle. Afin de reproduire la mesure de l'intensité du courant, ces facteurs ont fait l'objet d'une compensation dans le gain du système communiqué au logiciel de mesure.

En conclusion, ainsi que démontré expérimentalement, la forme d'onde de l'intensité induite par la décharge dans une boucle fermée est identique à celle de l'intensité de la décharge elle-même et la relation entre leurs valeurs crête peut être évaluée, à l'aide de l'équation (I.7), au moyen du rapport entre l'inductance mutuelle et l'inductance propre.

BIBLIOGRAPHIE

- [I.1] RUSCK (S.): Transactions of the Royal Institute of Technology, No. 120, *Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks*, Stockholm, 1958.

SERIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	Gestion des télécommunications y compris le RGT et maintenance des réseaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données, communication entre systèmes ouverts et sécurité
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information, protocole Internet et réseaux de prochaine génération
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication