



**Benoît de Metz-Noblat**

**Ingénieur ESE, il a travaillé dans le Groupe Saint-Gobain comme ingénieur de recherche, puis en maintenance et travaux neufs dans un site de production. Entré chez Merlin Gerin en 1986, il est maintenant au Service Etudes de Réseaux dans lequel il est responsable d'un groupe chargé des études de surtensions, d'harmoniques, et de stabilité dynamique des réseaux.**

**n° 168**

**la foudre et les  
installations  
électriques HT**

## lexique

---

**BIL** : (Basic Impulse Level) : niveau d'isolement au choc d'un appareil.

**PSEM** : Poste Sous Enveloppe Métallique, aussi appelé **poste blindé** en HTB et **appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse** selon le vocabulaire international (VEI 441-12-05), couramment dénommé **GIS** (Gas Insulated Switchgear) ou **appareillage hermétiquement clos** : ensemble d'appareillage de commande, protection et sectionnement, placé dans une enveloppe métallique étanche reliée à la terre et isolé dans du gaz (en général du SF6).

A ne pas confondre avec **l'appareillage blindé** (Metal-clad Switchgear) dont les matériels sont placés dans des compartiments distincts ayant des cloisons métalliques (cf. CEI 298).

**MCOV** : (Maximum Continuous Operating Voltage) : tension maximale permanente que doit supporter un parafoudre.

**tension de pas** : tension susceptible d'apparaître entre les deux pieds d'un marcheur.

### Remarque

Les niveaux de tensions font l'objet de différents classements selon les décrets, les normes, et autres spécifications particulières telles celles de certains distributeurs d'énergie, ainsi en ce qui concerne les tensions alternatives supérieures à 1 000 V :

■ le décret français du 14 novembre 1988 définit deux domaines de tension :

HTA =  $1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$ ,

HTB =  $U > 50 \text{ kV}$ .

■ le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) dans sa circulaire du 27 juillet 1992 précise :

MT =  $1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$ ,

HT =  $U > 35 \text{ kV}$ .

■ la publication CEI 71 précise des gammes de tensions les plus élevées pour le matériel :

gamme A =  $1 \text{ kV} < U < 52 \text{ kV}$ ,

gamme B =  $52 \text{ kV} \leq U < 300 \text{ kV}$ ,

gamme C =  $U \geq 300 \text{ kV}$ .

Une révision est prévue, elle retient seulement deux gammes :

gamme I =  $1 \text{ kV} < U \leq 245 \text{ kV}$ ,

gamme II =  $U > 245 \text{ kV}$ .

■ le distributeur national d'énergie en France, EDF, utilise maintenant le classement du décret cité ci-dessus.

Nota : Les sigles THT et UHT quelquefois utilisés ne sont définis par aucune norme. Dans ce Cahier Technique, THT est employé pour les tensions supérieures à 300 kV.

# la foudre et les installations électriques HT

## sommaire

<b>1. Introduction</b>		p. 4
<b>2. Le phénomène «foudre»</b>	Généralités	p. 5
	Principales caractéristiques	p. 5
	Prédiction de foudre	p. 6
	Mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique	p. 7
<b>3. La foudre et les installations électriques</b>	Foudroiement d'une ligne	p. 8
	Propagation d'onde	p. 9
	Effets dus à la foudre	p. 10
<b>4. Moyens de protection</b>	Principes généraux	p. 10
	Protection 1 <sup>er</sup> niveau	p. 11
	Protection 2 <sup>ème</sup> niveau	p. 12
	Protection 3 <sup>ème</sup> niveau	p. 12
	Distance de protection	p. 13
	Exploitation des réseaux et indisponibilité	p. 16
	Normes	p. 17
	<b>5. Exemple d'étude de foudre</b>	Généralités
Méthode de calcul		p. 19
Modélisation du poste		p. 19
Simulations déterministes		p. 20
Calcul statistique de la fréquence de foudroiement et du risque associé		p. 20
Interprétation de ces calculs		p. 22
<b>6. Conclusion</b>		p. 23
<b>Annexe : bibliographie</b>		p. 24

Ce Cahier Technique a plusieurs objectifs :

- présenter une synthèse globale sur le phénomène «foudre» et sur ses effets dans les installations électriques,
- indiquer les moyens opérationnels actuels de protection en vue de limiter les effets néfastes,
- évoquer les problèmes de continuité de service,
- montrer les points principaux du déroulement des études de foudre à partir d'un exemple sur une installation THT développé par le service Etude de Réseaux de Merlin Gerin.

Il est particulièrement orienté transport et distribution d'électricité, plus précisément réseaux HTA et HTB, pour lesquels la foudre doit être prise en compte dans la coordination de l'isolement lors de la conception des ouvrages. L'aspect BT est néanmoins évoqué mais plus rapidement.

Ce document est complété d'une courte bibliographie.

# 1. introduction

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres :

- toute la gamme de puissance et tous les niveaux de tension sont concernés : depuis le transport d'énergie THT jusqu'aux circuits intégrés en passant par les alimentations BT et les transmissions de données,
- elle peut être à l'origine de perturbations momentanées dans la continuité de service, donc de dégradations de la qualité des alimentations,
- elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues interruptions de service des installations,
- elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre).

La foudre a toujours été une cause de perturbations dans l'utilisation de

l'électricité. Mais il faut noter l'exigence assez récente et croissante de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, disponibilité, continuité de service...) ainsi que le souci toujours permanent de minimiser les coûts de production et d'utilisation de l'électricité. Cela conduit à constater que la foudre est devenue un « point dur » dans l'amélioration de tous ces facteurs. C'est pour cela qu'elle fait maintenant partie des grandes préoccupations des électriciens, qu'ils soient distributeurs d'énergie (EDF, régies), constructeurs de matériels (tel Merlin Gerin), concepteurs (Bureaux d'Études, ingénieries...), ou installateurs.

Une étude des effets de la foudre se déroule en deux étapes, mais nécessite au préalable une bonne connaissance du phénomène.

Pour cela des travaux internationaux importants ont été entrepris, en particulier par EDF, depuis les années 70, permettant maintenant une

description suffisante de ces mécanismes.

Ces deux étapes ont pour objectif :

- prévoir ce qui peut se passer sur une installation donnée et préconiser des solutions d'amélioration. Ceci est possible par l'utilisation de logiciels spécialisés qui simulent le comportement des installations, validé par l'expérience.

- puis réaliser une étude technico-économique de coordination de l'isolement prenant en compte le coût des installations, de la maintenance, des interruptions de service.

Rappel : la coordination de l'isolement consiste à définir, à partir des niveaux de tension et surtension susceptibles d'être présents sur une installation, un ou des niveaux de protection contre les surtensions, pour ensuite pouvoir choisir les matériels de l'installation et les dispositifs de protection. Ce sujet est traité dans le Cahier Technique n° 151.

## 2. le phénomène «foudre»

Dans ce chapitre, après quelques généralités sur les phénomènes électriques atmosphériques, sont présentés :

- les caractéristiques principales de la foudre du point de vue de l'ingénieur,
- puis des données de prédiction,
- enfin le mécanisme d'impact par le modèle électrogéométrique.

### généralités

La terre et l'électrosphère, zone conductrice de l'atmosphère (épaisseur de l'ordre de 50 à 100 km), constituent un condensateur sphérique naturel qui se charge par ionisation, d'où un champ électrique dirigé vers le sol de l'ordre de quelques centaines de volts/mètre.

L'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent associé, de l'ordre de 1 500 A pour tout le globe terrestre. L'équilibre électrique est assuré lors des décharges par pointes, par pluies et coups de foudre.

La formation des nuages orageux, masses d'eau sous forme d'aérosols, s'accompagne de phénomènes électrostatiques de séparation de charges : les particules légères chargées positivement sont entraînées par les courants d'air ascendants, et les particules lourdes chargées négativement tombent sous l'action de leur poids. Il arrive également qu'à la base du nuage se trouvent des îlots de charges positives à l'endroit de pluies intenses.

Globalement à l'échelle macroscopique, il y a création d'un dipôle.

Lorsque le gradient limite de tenue au claquage est atteint, une décharge se produit au sein du nuage ou entre nuages ou entre nuage et sol.

Dans ce dernier cas on parle de foudre.

Le champ électrique nuage-sol peut atteindre -15 à -20 kV/mètre sur sol plat. Mais la présence d'obstacles déforme et augmente localement ce champ d'un facteur 10 à 100 ou même 1 000 selon la forme des aspérités (phénomène aussi appelé «effet de pointe»). Le seuil d'ionisation de l'air atmosphérique est alors atteint, soit environ 30 kV/cm, et des décharges par effet couronne se produisent. Sur des objets d'assez grande taille (tour, cheminée, pylône) ces décharges peuvent être à l'origine des coups de foudre, ou les diriger.

### Classification des coups de foudre

Un Coup de Foudre -CdF-, entre nuages et terre, se décompose en deux phases : le développement d'une pré-décharge ou traceur (leader en anglais), canal ionisé, qui provoque le coup de foudre proprement dit, décharge d'arc visible de courant intense.

Les CdF se distinguent selon deux critères principaux qui sont leur sens de déplacement et leur polarité :

- CdF descendants : développement du traceur depuis les nuages vers le sol (cas sur terrains assez plats),

- CdF ascendants : développement du traceur depuis le sol vers les nuages (cas de terrains montagneux),

- CdF négatifs lorsque la partie négative du nuage se décharge (80 % des cas en pays tempérés),
- CdF positifs lorsque la partie positive du nuage se décharge.

### principales caractéristiques

#### Forme d'onde

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps.

La forme d'onde réelle est très variable : elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microsecondes à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes (cf. fig. 1).

Le domaine spectral associé s'étend dans une bande de 10 kHz à plusieurs MHz.

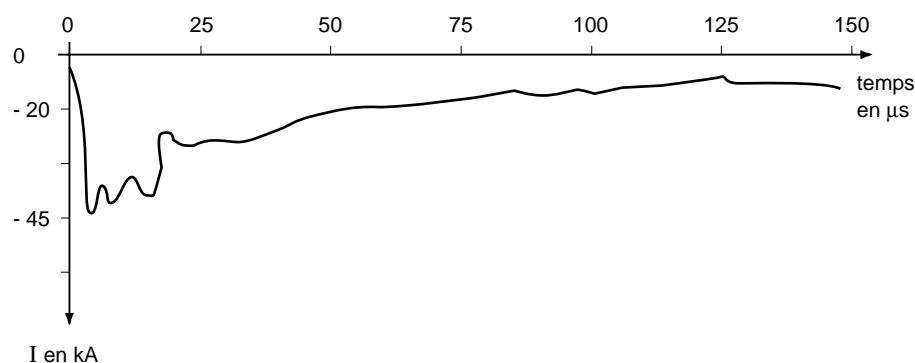


fig. 1 : oscillogramme d'un courant de foudre.

### Amplitude des coups de foudre

La distribution statistique expérimentale des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée dans la figure 2.

### Raideur de front

La distribution en raideur de front des coups de foudre est donnée dans la figure 3.

Pour les études de foudre les valeurs suivantes sont en général choisies :

- amplitudes 100 kA ou 200 kA auxquelles sont associées respectivement une probabilité de dépassement de 5 % et 1 %,
- forme d'onde triangulaire : temps de montée 2  $\mu$ s et temps de descente à mi-queue 50  $\mu$ s, d'où un front de 50 ou 100 kA /  $\mu$ s.

Nota : ce temps de front est différent de celui de l'onde normalisée (1,2  $\mu$ s) définie pour les essais en laboratoire (cf. CEI 60).

### Charge des coups de foudre

En moyenne cette charge est de quelques dizaines de coulombs mais elle peut dépasser 300 C.

## prédiction de foudre

L'implantation en France d'un réseau de localisation des décharges orageuses date de 1986 avec la création de Météorage.

Météorage exploite un réseau de stations de détection réparties sur l'ensemble du territoire national et reliées aux calculateurs d'un centre opérationnel basé à Paris.

Ces stations distantes de 200 à 300 km mesurent les ondes électromagnétiques créées par les décharges orageuses (sensibilité 800 km). Elles permettent d'établir une caractérisation des orages à partir des informations suivantes :

- localisation,
- datation (à la milliseconde),
- polarité d'onde (> 0, < 0),
- amplitude d'onde (0, à plusieurs centaines de kA),
- nombre d'arcs.

Météorage offre différents services qui intéressent des applications très diverses, en particulier le transport et la distribution d'énergie électrique.

Quelques exemples parmi ses prestations : alerte, signalisation, observation, surveillance, expertise, qualification, consultation, interrogation, statistiques.

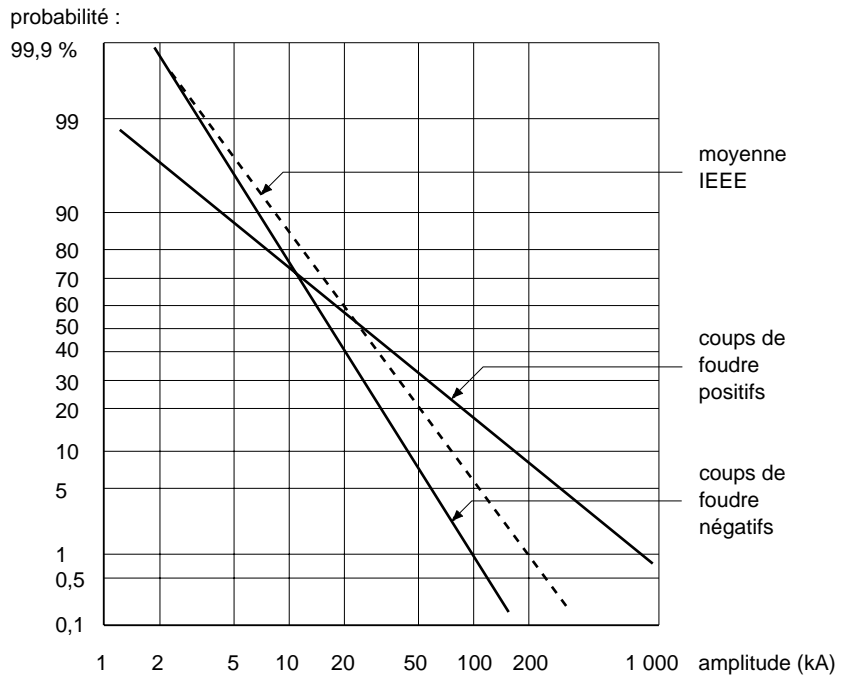


fig. 2 : distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, selon IEEE.

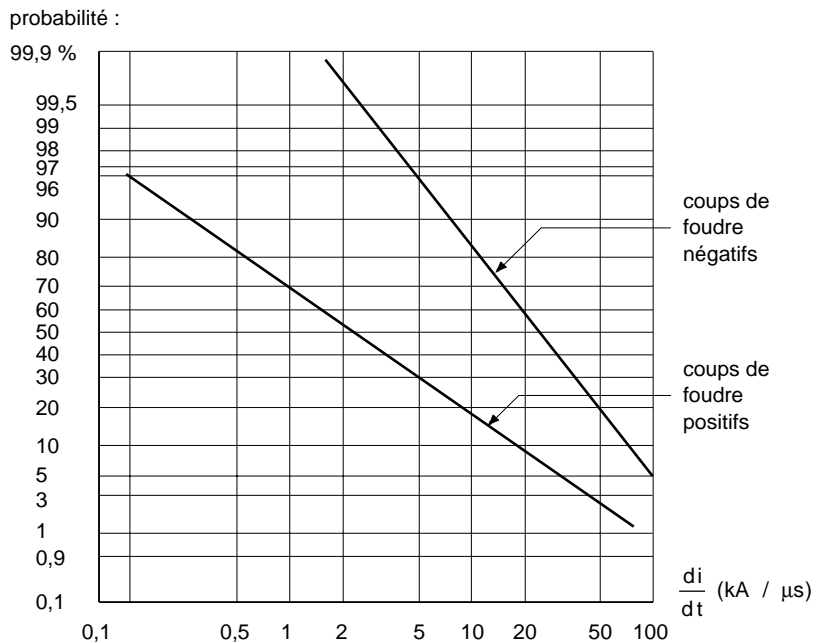


fig. 3 : distribution statistique expérimentale, en raideur de front, des courants de foudre, positifs et négatifs, suivant IEEE.

Les deux caractéristiques de prédiction suivantes sont utilisées dans les études de foudre.

### Niveau kéraunique Nk

C'est le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu à un endroit donné. Il s'agit d'une notion apparemment assez approximative mais en fait utile.

En France, le niveau Nk moyen est de 20 avec une fourchette allant de 10 en régions côtières de la Manche jusqu'à plus de 30 dans les régions montagneuses.

Dans le reste du monde, Nk peut être bien plus élevé, par exemple plus de 180 en Afrique tropicale ou en Indonésie.

### Densité de foudroiement N

C'est la densité annuelle de coups de foudre au sol exprimée en nombre de CdF / km<sup>2</sup> / an, quel que soit leur niveau d'intensité.

En France la densité N est comprise, selon les régions, entre 2 et 6 CdF / km<sup>2</sup> / an.

Une relation pratique lie, en valeur moyenne, Nk et N :  $N = Nk / 7$ .

### mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique

Le mécanisme d'impact de la foudre se déroule de la façon suivante :

- un traceur issu d'un nuage se rapproche du sol à faible vitesse ;
- lorsque le champ électrique est suffisant, une conduction brutale s'établit donnant lieu à la décharge de foudre.

- une approche pratique expérimentale a permis d'établir la relation qui lie la distance d'entre les points d'amorçage et de décharge d'un canal de foudre à l'intensité I du coup de foudre :

$$d = 9,4 \times I^{2/3} \text{ ou } d = 6,7 \times I^{0,8} \text{ selon}$$

les auteurs, avec :

d = distance d'amorçage en mètres (striking distance),

I = courant de foudre en kA.

- le modèle électrogéométrique est alors développé tel celui appliqué à une tige verticale donné par l'exemple ci-après (cf. fig. 4).

Soit une tige verticale de hauteur h et de sommet H, les zones définies dans l'espace sont les suivantes :

- zone I, entre le sol et la parabole p, lieu des points équidistants de H et du sol : à l'instant d'amorçage, tout traceur étant dans cette zone touchera le sol puisque plus près de celui-ci que de H.

- zone II, au dessus de la parabole : à l'instant d'amorçage, tout traceur étant

dans cette zone sera capté par H dès que la distance H au traceur est inférieure à la distance d'amorçage d. Pour un courant d'intensité donnée I donc de distance d'amorçage définie, la distance à la tige x, dite rayon de capture, est :

$$\text{si } d > h \quad x = \sqrt{2 \cdot d \cdot h - h^2}$$

$$\text{si } d < h \quad x = d$$

Le rayon de capture de la tige est d'autant plus grand que le coup de foudre est intense.

Pour de très faibles intensités, le rayon de capture devient inférieur à la hauteur de la tige qui peut alors devenir captatrice sur sa longueur, ce qui est vérifié expérimentalement.

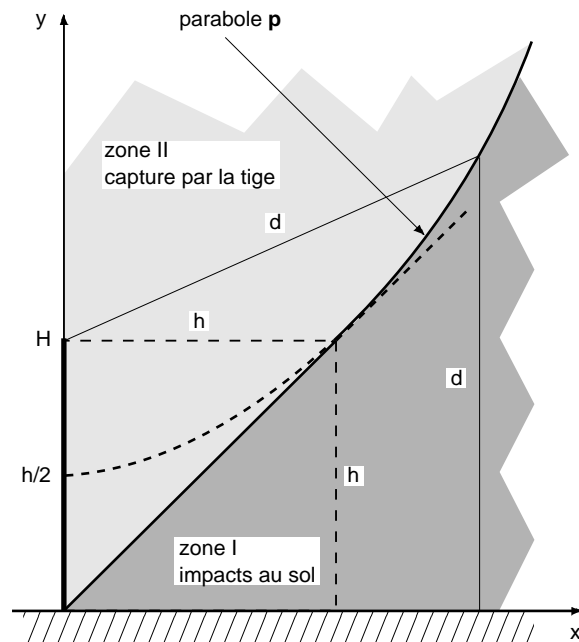


fig. 4 : représentation des différentes zones de protection offertes par une tige verticale.

### 3. la foudre et les installations électriques

Ce chapitre aborde l'analyse du foudroiement d'une ligne, des généralités sur les effets de la foudre et donne quelques informations sur la propagation des ondes.

#### foudroiement d'une ligne

A partir du modèle électrogéométrique, la fréquence de foudroiement se calcule en tenant compte de la surface de capture de l'élément considéré.

La figure 5 donne, pour une densité de  $N = 4 \text{ CdF / km}^2 / \text{an}$  (soit un niveau kéraunique d'environ 30), la fréquence de foudroiement (nombre de CdF par an) d'une tige verticale de hauteur  $h$  et d'un conducteur horizontal de longueur 100 km à une hauteur  $h$ .

La formule empirique générale indiquant le foudroiement (nombre total de CdF par an) d'une ligne (pylônes, câbles de phases et de garde) est la suivante :

$$N_L = Nk \left( \frac{N1}{30} + \frac{l}{70} \right) \cdot \alpha \cdot \frac{L}{100}$$

avec :

- Nk = niveau kéraunique,
- $N_L$  = foudroiement de la ligne,
- N1 = foudroiement du conducteur horizontal le plus élevé (cf. fig. 5),
- L = longueur de la ligne en km,
- l = largeur de la ligne en m (entre les conducteurs extérieurs),
- $\alpha$  = facteur d'influence des pylônes et des câbles de garde (cf. fig. 6).

Cette expression prend en compte :

- le foudroiement d'un conducteur ( $N1$ ),
  - la présence des conducteurs extérieurs (l),
  - la répartition entre pylône et ligne fonction de la structure de la ligne ( $\alpha$ ),
  - la longueur de la ligne (L) :
- pour un calcul de coordination d'isolement,  $L \approx 1,5 \text{ km}$  est généralement choisie car au-delà l'effet de la foudre devient négligeable,
  - pour un calcul de continuité de service, c'est la longueur totale de la ligne sur laquelle des amorçages sont possibles, donc des interruptions de service, qui est retenue.

#### Coups de foudre directs (sur conducteurs de phase)

Lorsque la foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant  $i(t)$  se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde Z de valeur comprise entre 300 et 500  $\Omega$  (cf. fig. 7).

Il s'en suit une onde de tension associée :

$$u(t) = Z \cdot \frac{i(t)}{2}$$

Au niveau des pylônes la tension croît et se propage :

- en onde pleine en atteignant sa valeur maximale

$$U_{\max} = Z \cdot \frac{I_{\max}}{2}$$

lorsque

$$Z \cdot \frac{I_{\max}}{2} < U_a$$

avec  $U_a$  = tension d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs ou des éventuels éclateurs de protection, elle est sensiblement proportionnelle à

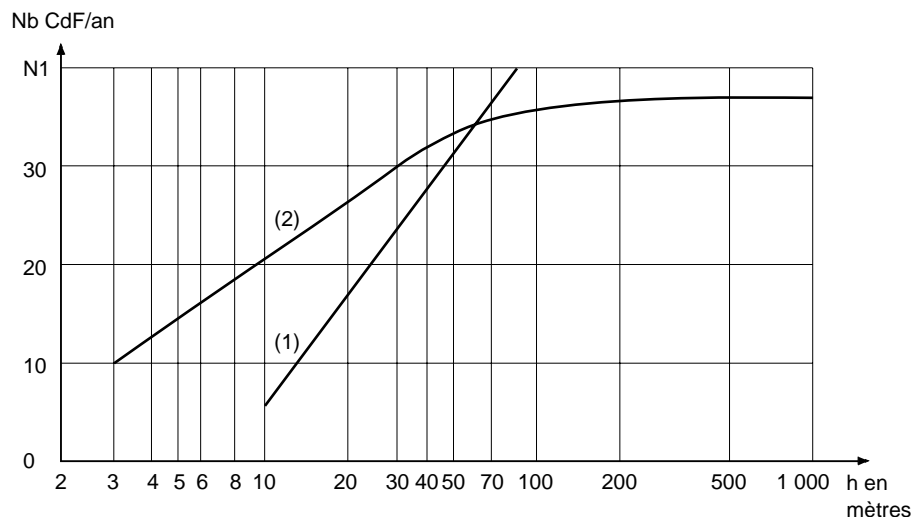


fig. 5 : fréquence de foudroiement pour une densité  $N = 4 \text{ CdF / km}^2 / \text{an}$  :  
 ■ courbe 1 : d'une tige verticale de hauteur  $h$  (avec  $N1 \times 10^{-3}$ ),  
 ■ courbe 2 : d'un conducteur horizontal de longueur 100 km à une hauteur  $h$  (avec  $N1$ ).

		nombre de câbles de garde			
		0	1	2	3
foudroiement	sur pylône (%)	55	35	20	10
	sur portée (%) (câbles de garde et de phases)	45	65	80	90
facteur d'influence	$\alpha$	1,65	1,40	1,20	1,05

fig. 6 : répartition du foudroiement d'une ligne entre les pylônes et les conducteurs.



la longueur de la distance dans l'air ( $\approx 550 \text{ kV / m}$ ), et doit tenir compte d'un retard à l'amorçage pour les fronts très raides,

■ en onde coupée à la tension d'amorçage lorsque

$$Z \cdot \frac{I_{\max}}{2} \geq U_a$$

La valeur limite du courant de foudre au delà de laquelle il y a amorçage, donc interruption de service, est appelée courant critique  $I_c$  :

$$I_c = 2 \cdot U_a / Z.$$

L'ordre de grandeur de  $I_c$  est de 5,5 kA pour les lignes 225 kV, 8,5 kA pour 400 kV, 19 kA pour 750 kV. Les fréquences correspondantes sont respectivement de 95 %, 90 %, et 60 % (cf. fig. 2) . A noter qu'en 20 kV sa valeur est voisine de 0, d'où des amorçages systématiques.

### Coups de foudre indirects (sur conducteurs de garde ou pylônes)

(cf. fig. 8)

Dans ce cas l'écoulement du courant de foudre vers la terre provoque une élévation du potentiel des structures métalliques.

La tête du pylône atteint un potentiel dépendant de son inductance propre  $L$  et de la résistance de terre  $R$  au choc.

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

La tension peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs. Il s'agit de l'« amorçage en retour » ou « backflashover ». Une partie du courant se propage alors sur la ou les phases amorcées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un CdF direct.

En très haute tension l'amorçage en retour est peu probable (niveau d'amorçage des isolateurs), c'est pourquoi l'installation de câbles de garde est intéressante (interruptions de service limitées). Mais en dessous de 90 kV l'amorçage en retour se produit même pour de faibles valeurs de la résistance de terre ( $< 15 \Omega$ ), d'où un intérêt limité (interruptions de service plus fréquentes).

### propagation d'onde

La propagation de l'onde de foudre est un concept auquel l'électrotechnicien a peu à faire dans ses travaux quotidiens.

Qu'en est-il en réalité ?

Toute modification de l'état électrique d'un conducteur en l'un de ses points se propage à grande vitesse, de 150 000 à 300 000 km/s selon le diélectrique entourant le conducteur, soit à la fréquence industrielle de 50 Hz une distance parcourue de 3 000 à 6 000 km en une période.

Dans le domaine industriel, cette distance est, sauf cas particulier, sans commune mesure avec la longueur des conducteurs concernés. Il est alors légitime de simplifier en considérant que la transmission d'onde est instantanée en tout point de l'installation.

Dans le cas de la foudre, il s'agit de phénomènes à « haute fréquence » : de quelques dizaines de kHz à plusieurs MHz, à comparer avec la « basse

fréquence » industrielle de 50 Hz ou 60 Hz.

### Particularités des phénomènes « haute fréquence »

Dans ce domaine de fréquences, les lois de l'électricité habituellement utilisées ne sont plus suffisantes :

■ d'une part, l'hypothèse de quasi stationnarité, supposant que la tension se transmet instantanément en tous points d'un réseau, devient fautive : le temps de transmission n'est plus négligeable devant la période des phénomènes étudiés (exemple : à 1 MHz, la période est de  $1 \mu\text{s}$  soit 300 m).

■ d'autre part, les capacités parasites des éléments, l'effet de peau, le couplage électromagnétique... deviennent importants voire prépondérants.

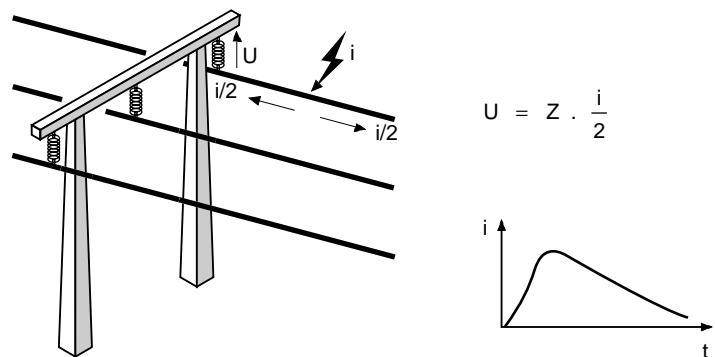


fig. 7 : chute de la foudre sur un conducteur de phase.

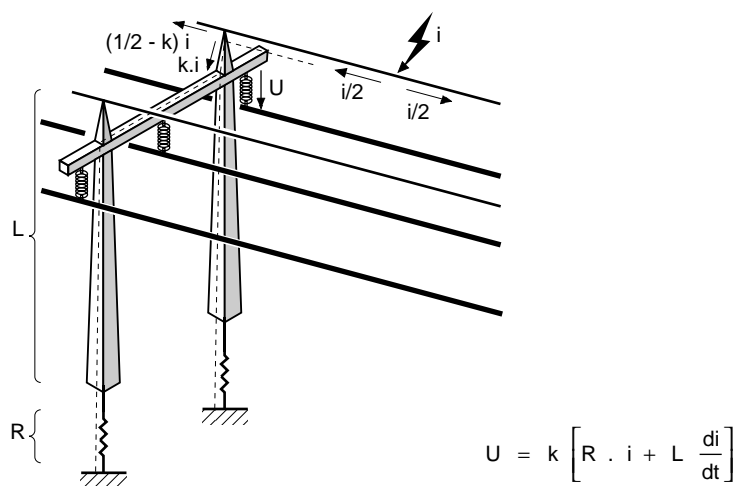


fig. 8 : chute de la foudre sur un câble de garde.

### ...et conséquences pratiques quant aux études

Il s'ensuit que pour appréhender quantitativement les effets de la foudre, (cf. exemple au chapitre 5) il faut :

- tout d'abord considérer les lois de propagation des ondes, connues sous le nom «d'équations du télégraphiste».

Eu égard aux distances parcourues (quelques mètres à quelques kilomètres) le régime des ondes ne s'établit pas instantanément, dans l'espace et le temps.

- ensuite tenir compte des lois de réflexion, de réfraction aux points de discontinuités, et de superposition des ondes à chaque instant et en chaque endroit.

- enfin, adapter le modèle qui décrit les équations de fonctionnement physique des éléments pour tenir compte des phénomènes prépondérants en haute fréquence.

Exemple : un transformateur soumis à un transitoire ne se comporte plus, à cette fréquence, comme une inductance en série avec un rapport de transformation, mais comme un diviseur capacitif (capacités HT/terre, BT/terre, HT/BT). Dans ce cas le rapport de transformation HT/BT peut être très différent de sa valeur à fréquence industrielle.

### Atténuation de propagation due à l'effet couronne

Les surtensions atmosphériques qui se propagent le long des conducteurs sont

déformées à cause de l'effet couronne (perte par ionisation de l'air entourant le conducteur, importante pour  $U > 1$  MV). Cela se traduit par une atténuation de leur amplitude et de la raideur de leur front. Il est estimé qu'après 1,5 km les surtensions atmosphériques ne présentent plus de danger pour les postes.

### effets dus à la foudre

Dans ce paragraphe sont pris en considération les principaux effets, directs et indirects, consécutifs à la propagation du courant de foudre. A noter que même si ce courant arrive par la haute tension, il peut atteindre tous les circuits électriques (perturbations conduites et rayonnées). Ces effets, qui concernent donc tous les niveaux de tension, sont :

- thermiques (fusion d'éléments, incendies, explosions).

- mécaniques, dus aux efforts électrodynamiques des conducteurs parallèles proches.

- de choc diélectrique, suite aux montées en potentiel lors de la propagation d'onde à travers les impédances présentées par les conducteurs.

- de perte d'isolement par contournement de l'isolateur d'une phase entraînant un «courant de suite» à la terre à fréquence industrielle.

- d'élévation de potentiel de terre : il est usuel d'atteindre des potentiels de plusieurs centaines de kV au puits de

terre de l'équipement HT concerné. La loi de variation, fonction de la distance à la prise de terre, est approximativement hyperbolique, d'où des potentiels, et leurs gradients associés, très grands à proximité des puits de terre, même à plusieurs dizaines de mètres.

- électromagnétiques à haute fréquence (spectre très large) : rayonnement parasite, induction et couplage de circuits.

- également électrochimiques, acoustiques et physiologiques.

Tous ces phénomènes sont source de :

- dégradation de matériel, de façon brutale comme les claquages diélectriques par surtension, ou par vieillissement prématuré à cause de contraintes non destructrices immédiatement mais répétées,

- dysfonctionnement des installations particulièrement au travers des circuits à courants faibles, exemple : perturbations parasites des équipements de contrôle-commande et de communication,

- réduction de la continuité de service par des interruptions longues (cas de destruction de matériel) ou courtes (dysfonctionnement des automatismes de réseaux),

- danger pour l'homme et les animaux, notamment par l'apparition de la tension de pas pouvant entraîner une électrisation voire électrocution.

## 4. moyens de protection

Après quelques principes généraux de protection, sont développés, plus en détail, les moyens de protection primaire (par décharge directe) puis secondaire (par limitation des perturbations transmises).

### principes généraux

La protection en général, et des personnes en particulier, est d'autant meilleure qu'un écoulement maximal des perturbations vers la terre est

assuré, le plus près possible des sources de perturbation.

La condition d'une protection efficace est donc d'assurer des impédances de terre minimales, en créant des maillages et des interconnexions de prises de terre chaque fois que possible. En pratique, en HTB, dans les postes une impédance de terre inférieure à  $1 \Omega$  à fréquence industrielle est habituellement demandée, et pour les pylônes une impédance de  $10$  à  $15 \Omega$  est recherchée.

Contre les courants de foudre et les élévations de potentiel qu'ils induisent, il y a lieu de distinguer plusieurs niveaux de protection (critère d'énergie) :

- premier niveau : dérivation vers le sol de l'essentiel de l'impact, et premier écrêtage. Ce niveau intéresse principalement les ouvrages susceptibles d'être foudroyés (lignes et postes).

- deuxième niveau : limitation de la tension résiduelle par écrêtage

complémentaire. Il est destiné à protéger, contre les surtensions conduites, les équipements des postes et/ou des installations. Plusieurs dispositifs de protections répartis dans l'installation peuvent être nécessaires à la dissipation de l'énergie associée à l'écrêtage.

■ troisième niveau : en BT, dans le cas d'équipements sensibles (informatique, automatismes, télécommunications, réseaux BT, ...), et en complément des niveaux précédents, des dispositifs supplémentaires tels que filtres série et/ou limiteurs de surtensions peuvent être nécessaires.

Nota : il est préférable que toutes ces protections soient envisagées dès la conception des installations ou des systèmes. Ceci pour éviter des modifications ultérieures difficiles à mettre en œuvre et de coût élevé.

## protection 1<sup>er</sup> niveau

Son but est de limiter les impacts directs sur les ouvrages électriques en détournant la foudre vers des lieux d'écoulement privilégiés.

Détourner la foudre de façon contrôlée vers des points précis se fait au moyen de :

■ paratonnerres basés sur le principe de la distance d'amorçage : ce sont des tiges effilées placées en haut des structures à protéger, reliées à la terre par le chemin le plus direct (conducteurs de descente entourant l'ouvrage à protéger et interconnectés au réseau de terre).

Les observations montrent que la protection est bonne contre les coups de foudre directs dans un cône dont le sommet coïncide avec la pointe et de demi angle au sommet 45°.

■ cages maillées ou de Faraday qui consistent en la réalisation d'un maillage fermé de conducteurs horizontaux et verticaux reliés au sol à un réseau de terre. La largeur de maille est inférieure à 15 mètres et des tiges verticales sont placées aux noeuds des mailles, en partie supérieure. La couverture de la zone à protéger est équivalente à une multiplicité de paratonnerres.

Dans ces deux cas (paratonnerres et cages maillées), le modèle électro-géométrique permet de déterminer la zone protégée par la

méthode de la « sphère fictive » : le point d'impact de la foudre est déterminé par l'objet au sol le plus proche de la distance d'amorçage  $d$  du traceur. Tout se passe comme si le traceur était entouré d'une sphère fictive de rayon  $d$  se déplaçant avec lui. Pour une bonne protection il faut que la sphère fictive roulant sur le sol, atteigne un dispositif de protection sans toucher les objets à protéger (cf. fig. 9).

Ainsi pour une protection contre un courant de foudre très faible, 2 kA environ (probabilité cumulée  $\approx 100\%$ ), la distance d'amorçage critique est de 15 m. Si une probabilité de 97 % est

acceptable, le courant de foudre correspondant est alors de 5 kA et la distance critique de 27 m.

■ la création d'écrans

Les câbles de garde entrent dans cette catégorie. Ce sont des conducteurs parallèles aux câbles de phases, situés au dessus d'eux et reliés à la terre par l'intermédiaire des pylônes. Ils constituent une protection efficace contre le foudroiement des lignes aériennes : leur mission est de capter les coups de foudre dont l'intensité est supérieure au courant critique  $I_c$ .

Les notions développées au chapitre précédent permettent de déterminer la position optimale des câbles de garde.

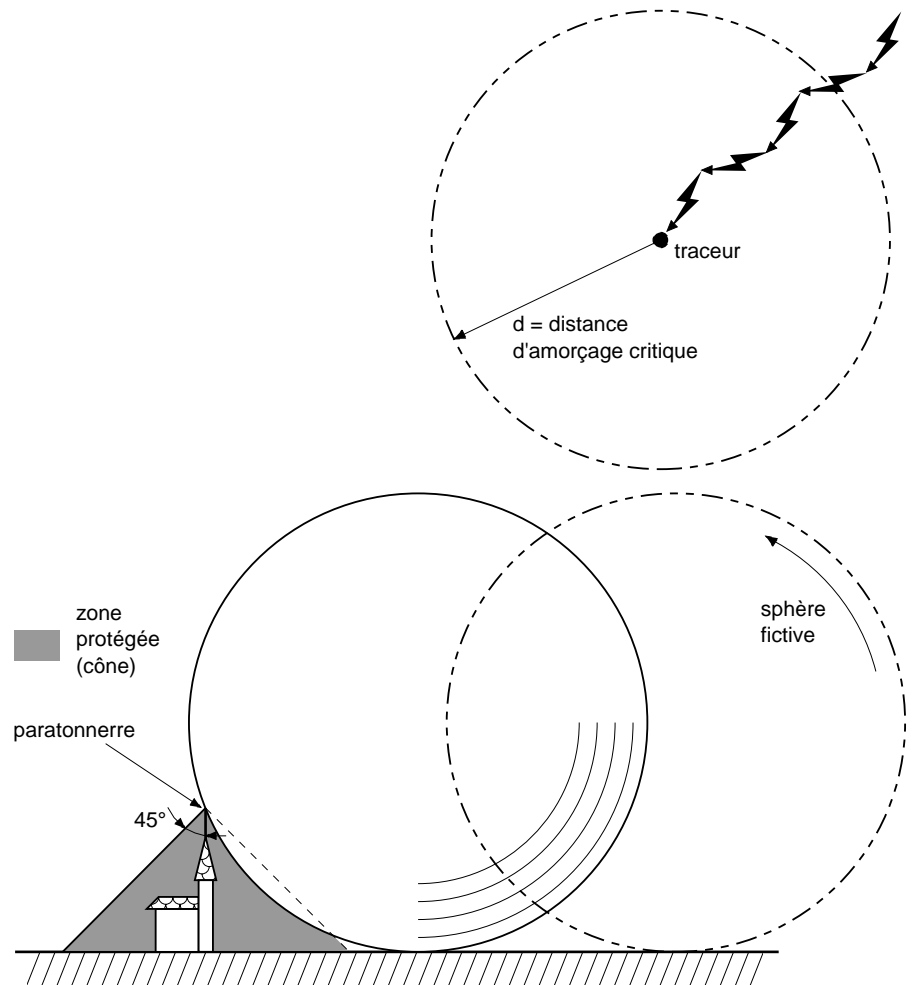


fig. 9 : détermination d'une zone protégée par la méthode de la « sphère fictive ».

Sur le schéma de la figure 10, sont présentés les différentes zones d'amorçage d'une ligne aérienne :

- la zone I : amorçage au sol,
- la zone II : amorçage de la phase sans contournement d'isolateur ( $I < I_c$ ),
- la zone III : amorçage sur câble de garde.

La protection des phases par le câble de garde est déterminée par l'angle optimal de protection  $\theta_{opt}$ .

Lorsque  $\theta \neq \theta_{opt}$ , des « défauts d'écran » sont possibles : des coups de foudre d'amplitude supérieure au courant critique peuvent atteindre les conducteurs de phases et provoquer des défauts. Le nombre de défauts d'écran est fonction de  $\theta$ .

### protection 2<sup>ème</sup> niveau

Cette protection s'applique en haute tension.

Son objectif est d'assurer que le niveau d'isolement au choc ou BIL (Basic Impulse Level) des différents éléments du poste ne soit pas dépassé (coordination des isolements).

Son principe est de créer un circuit de dérivation à la terre, permettant ainsi l'écoulement du courant de foudre, par amorçage ou conduction. Deux types d'appareils sont utilisés pour limiter la tension : l'éclateur, plus ancien, et le parafoudre qui tend à le supplanter dans de nombreuses applications.

■ l'éclateur, qui fonctionne par amorçage, présente des handicaps importants :

- une assez grande dispersion de sa tension d'amorçage (jusqu'à 40 %),
- un retard à l'amorçage fonction de la surtension,
- un amorçage sensible aux influences externes, conditions atmosphériques par exemple,
- il crée un front d'onde coupée très raide pouvant détruire les enroulements de machines situées à proximité,
- il crée aussi un courant de suite à 50 Hz, le courant ainsi dérivé est « vu » par l'appareil de protection contre les défauts terre qui commande alors l'ouverture en amont de la ligne touchée.

■ le parafoudre est un semi-conducteur à résistance non linéaire (de plusieurs M $\Omega$  à quelques  $\Omega$ ), en général à l'oxyde de zinc (ZnO), dont les caractéristiques sont bien maîtrisées.

Il est connecté entre phases et terre.

- son fonctionnement est similaire à celui de l'éclateur, mais il contrôle mieux la tension :
  - peu de dispersion de sa tension résiduelle caractéristique  $U = f(I)$  ou «residual voltage»,
  - retard à la conduction quasiment nul,
  - retour naturel à l'état initial (isolant) donc sans établissement d'un courant de suite.
- principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre
  - sa tension maximale permanente, ou «Maximum Continuous Operating Voltage» -MCOV- doit être supérieure à la tension maximale d'exploitation du réseau, avec une marge de sécurité de 5 %,
  - sa tension nominale, ou «rated voltage» fixée à  $1,25 \times \text{MCOV}$ ,
  - son niveau de protection,

- sa capacité énergétique à supporter des surtensions temporaires, donnée par une courbe amplitude-durée.

■ l'utilisation d'un parafoudre ou d'un éclateur n'est efficace que sous certaines conditions d'implantation, et en particulier selon les distances qui le séparent du matériel à protéger et de sa terre ; d'où l'importance de la notion de «distance de protection» du parafoudre, objet d'un paragraphe spécifique.

### protection 3<sup>ème</sup> niveau

Appliquée en BT et pour les équipements sensibles, cette protection contre la foudre et/ou ses effets n'est pas développée dans ce Cahier Technique, elle fait l'objet d'ouvrages cités dans la bibliographie annexée.

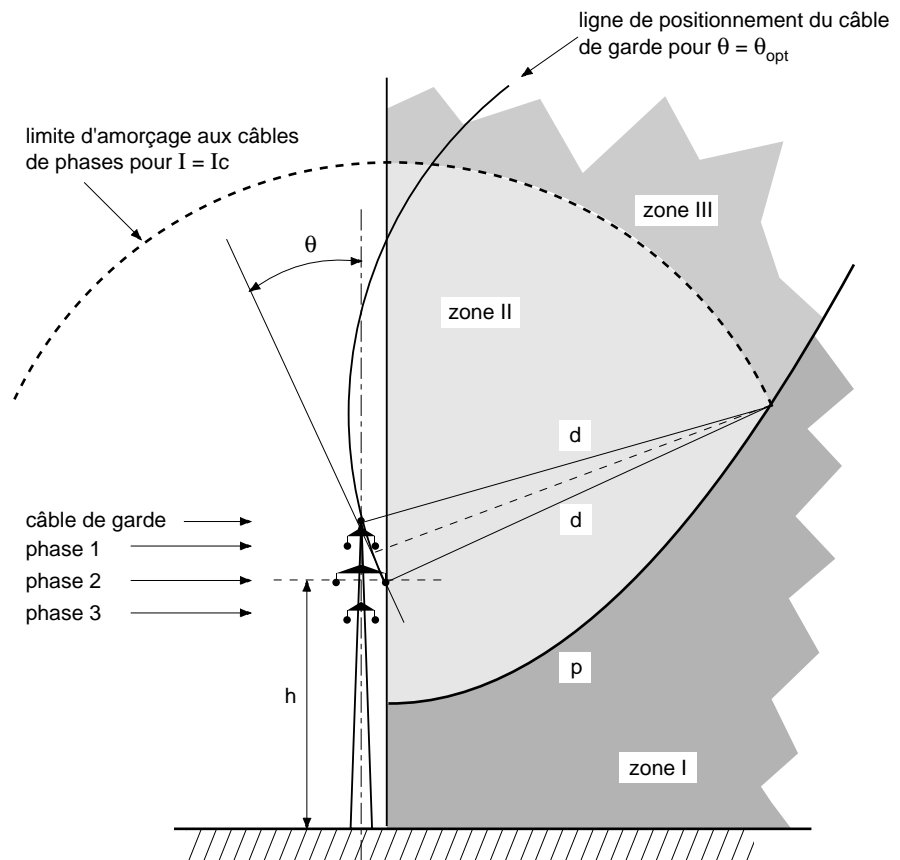


fig. 10 : les différents cas d'amorçage d'une ligne aérienne, à noter ici que l'angle de protection  $\theta = \theta_{opt}$ .

A titre indicatif, elle se réalise avec les méthodes et les éléments suivants :

- étude de compatibilité électromagnétique (CEM),
- conception des réseaux de terre (interconnexions, dimensionnement...),
- coordination des limiteurs de surtensions avec les protection de surcharge et de court-circuit, et les dispositifs différentiels,
- protection parallèle limitant les tensions de choc au moyen de parasurtenseurs : éclateurs à gaz, varistances (SiC, ZnO), diodes à avalanche, filtres RC,
- protection série limitant la puissance transmise à l'aide d'absorbeurs d'ondes, ou filtre HF, transformateurs d'isolement à écran, conditionneurs de réseau, ou alimentations statiques sans interruption -aussi appelées onduleurs-.

## distance de protection

La notion de «distance de protection» est mise en évidence dans l'exemple suivant, volontairement simpliste.

### Exemple

Une onde de surtension se propage sur une ligne et arrive au niveau d'un poste constitué d'un transformateur protégé par un parafoudre (cf. fig. 11).

Les différents éléments sont définis ainsi :

- ligne :
  - impédance caractéristique :  $Z_c$ ,
  - vitesse de propagation d'onde :  $v$ ,
  - distance parafoudre-transformateur :  $D$ ,
  - temps de propagation entre A et B :  $\tau = D / v$ ,
- parafoudre à caractéristique parfaite : pour toute tension appliquée supérieure à  $V_p$ , sa conduction est instantanée et sa limitation rigoureuse à  $V_p$ ,
- la prise de terre a une impédance nulle,
- les connexions matériel-parafoudre et parafoudre-terre sont de longueur nulle,
- transformateur : aux fréquences considérées, son impédance d'entrée est très supérieure à  $Z_c$ , ainsi une onde en tension arrivant sur le transformateur est à peu près totalement réfléchi (doublement de la tension au point de réflexion),
- onde de surtension incidente : elle a un front de raideur constante  $r = dV / dt$

et une tension constante sur la queue avec  $T = V_p / r$  temps de montée du front de l'onde jusqu'à  $V_p$  (cf. fig. 12). Trois cas peuvent se présenter, ils sont résumés dans le tableau de la figure 13. Les diagrammes des figures 14, 15 et 16 décrivent respectivement les phénomènes des cas 1 et 2. (Voir pages 14, 15 et 16). Exemple : si la tension de choc maximale admissible par le transformateur est fixée à  $1,3 \cdot V_p$ , alors

$$1,3 \cdot V_p \geq V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$$

D'où la distance parafoudre-transformateur à ne pas dépasser :

$$D \leq 0,15 \frac{V_p \cdot v}{r} = 0,15 \cdot T \cdot v$$

Application numérique, avec :

$$\begin{aligned} V_p &= 1\,200 \text{ kV}, \\ v &= 300 \text{ m} / \mu\text{s}, \\ r &= 2\,000 \text{ kV} / \mu\text{s}, \\ \Rightarrow D &\leq 27 \text{ m}. \end{aligned}$$

Nota :

- dans la réalité il faut tenir compte :
- des connexions des parafoudres, aux matériels et à la terre,
- des caractéristiques réelles des parafoudres,
- de la configuration du réseau avec les ruptures d'impédances et les différentes vitesses de propagation,
- des éléments capacitifs dont les transformateurs.

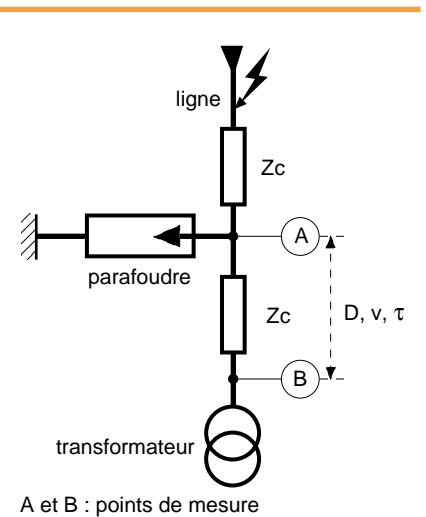


fig. 11 : schéma d'un circuit (ligne et poste de transformation) pour l'étude de la propagation d'une onde de surtension de foudre.

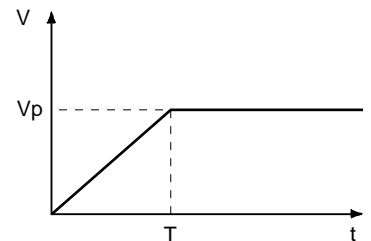


fig. 12 : représentation d'une onde de surtension.

cas	critère	surtension maximale sur le transformateur	commentaires
1	$D > \frac{v \cdot V_p}{2 \cdot r}$ soit : $T < 2 \cdot \tau$	$2 \cdot V_p$	front $r$ raide, distance $D$ importante. Pas d'effet de distance du parafoudre sur la tension maximale du transformateur, le parafoudre limite cette tension à $2 \cdot V_p$ .
2	$D < \frac{v \cdot V_p}{2 \cdot r}$ soit : $T > 2 \cdot \tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ dépassement $= 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p \cdot \frac{2\tau}{T}$ $\Rightarrow V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v} = V_p \left(1 + \frac{2 \cdot \tau}{T}\right)$	front $r$ lent, distance $D$ courte. La présence du parafoudre limite, par effet de distance, la tension maximale du transformateur : le dépassement du seuil $V_p$ est proportionnel à $D$ et à $r$ , d'où la notion de «distance de protection».
3	$D = \frac{v \cdot V_p}{2 \cdot r}$ soit : $T = 2 \cdot \tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p + V_p = 2V_p$	cas limite entre 1 et 2.

fig. 13 : surtensions maximales sur le transformateur, et exemple pratique.

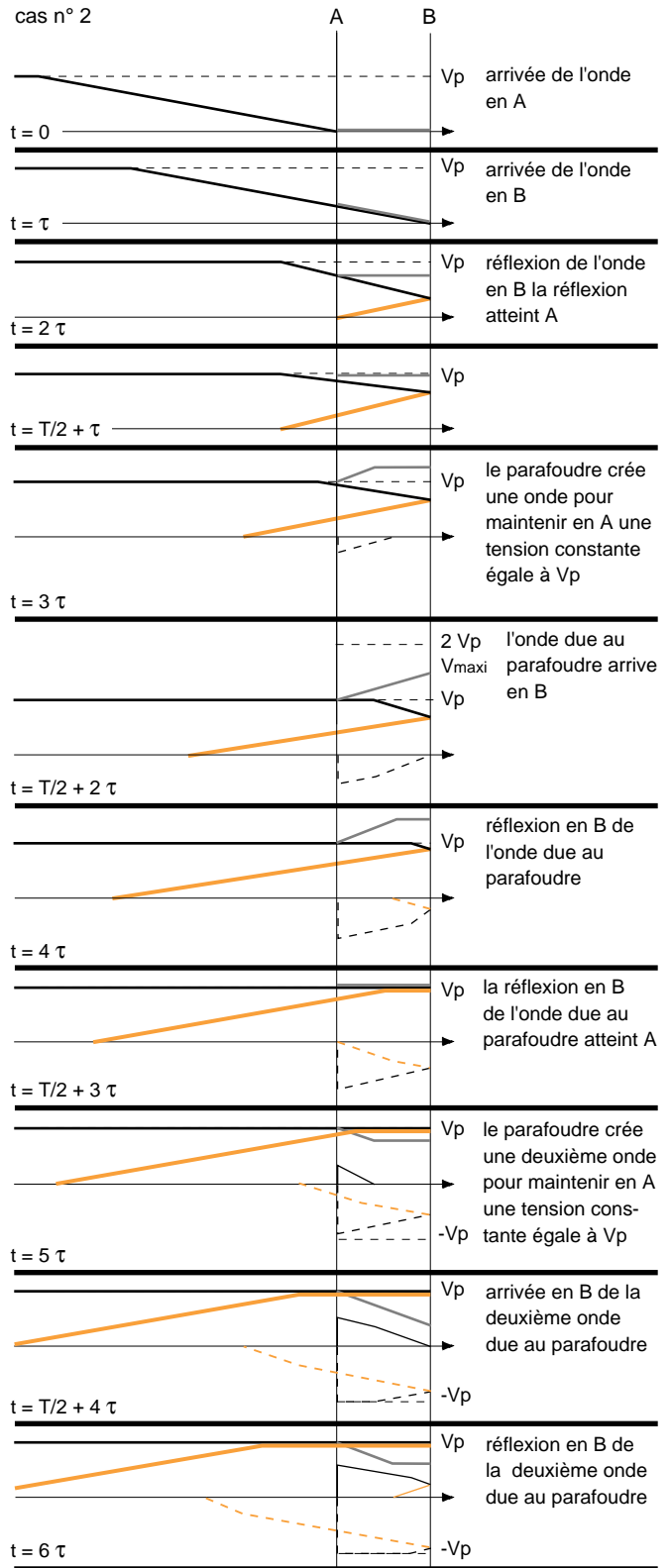
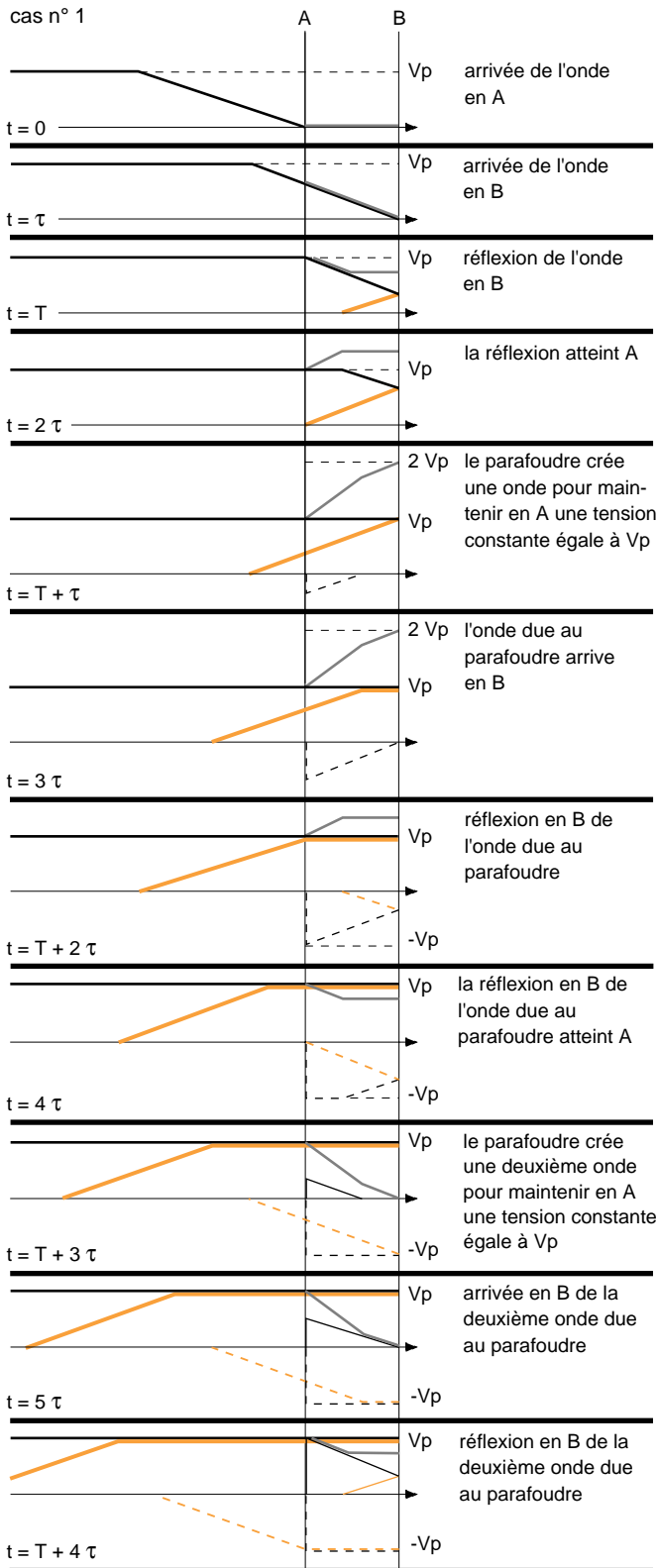


fig. 14 (ci-contre) : diagrammes de la propagation d'une onde de tension de foudre cas 1 (front raide) et 2 (front lent) du tableau de la figure 13, positions A et B données sur la figure 11.

- |         |                                       |         |  |
|---------|---------------------------------------|---------|--|
| —       | onde incidente (T)                    | —       | onde incidente (T) réfléchiée                        |
| - - - - | première onde créée par le parafoudre | - - - - | première onde créée par le parafoudre, et réfléchiée |
| —       | deuxième onde créée par le parafoudre | —       | deuxième onde créée par le parafoudre, et réfléchiée |
| —       | profil de tension                     |         |  |

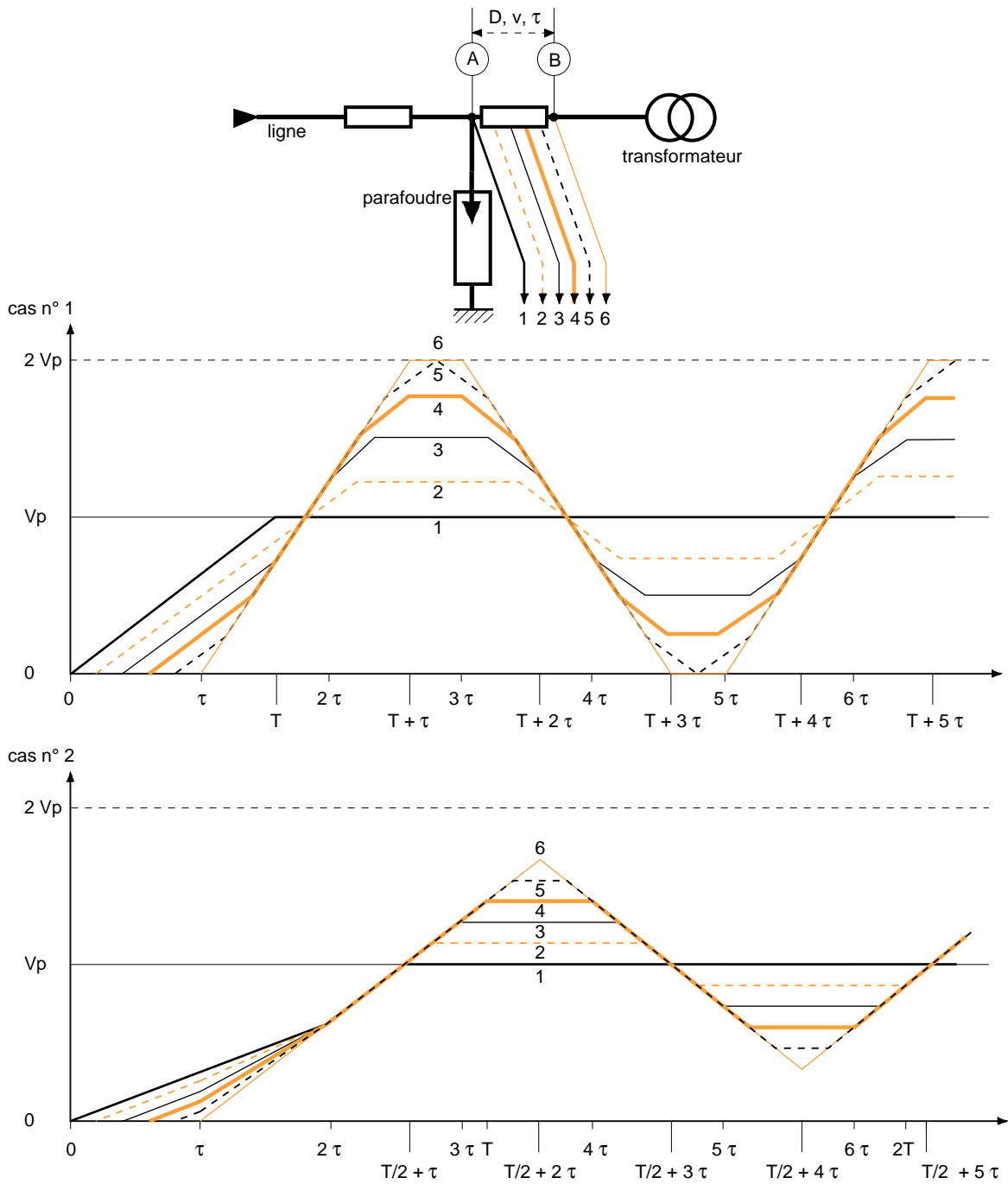


fig. 15 : répartition temporelle des tensions dans la liaison protégée par le parafoudre cas 1 (front raide) et 2 (front lent) du tableau de la figure 13.

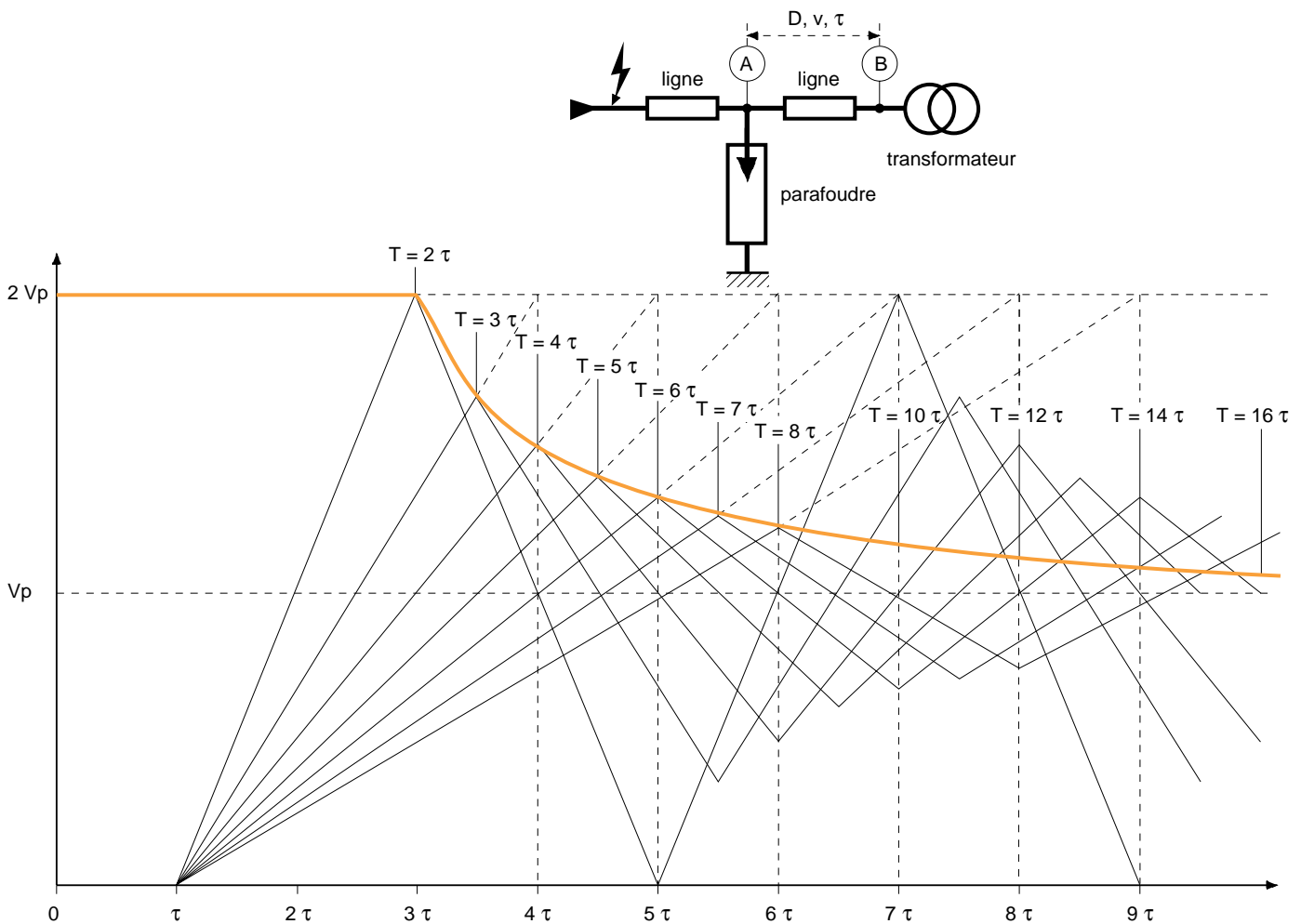


fig. 16 : diagramme de la surtension maximale sur le transformateur (point B du schéma) en fonction de  $T$  pour  $\tau$  donné (cas 2 du tableau de la figure 13).

## exploitation des réseaux et indisponibilité

Dans les réseaux de distribution publique, la foudre est une des causes (50 %) de creux de tension et de coupures brèves.

Ces coupures d'alimentation, réalisées par les appareils de protection, sont nécessaires à l'élimination du défaut (fin de l'amorçage d'un éclateur ou arrêt du contournement d'un isolateur).

Pour améliorer la continuité de service, leurs durées sont réduites (coupures brèves) par les réenclenchements automatiques des appareils de protection (disjoncteurs).

Les cycles de réenclenchement sont différents selon les niveaux de tension :

- en THT : réenclenchement rapide en monophasé (< 0,5 s) ou lent en triphasé (1,5 s à 5 s),

- en HTB : réenclenchement triphasé et emploi de disjoncteur shunt en monophasé (0,15 s),

- en HTA : réenclenchement rapide et lent triphasé (0,35 s, 15 s).

Pour l'utilisateur, ces coupures représentent une gêne qu'il est possible d'atténuer ou d'éliminer par :

- l'utilisation de sources auxiliaires de type alimentation statique sans interruption (souvent appelée onduleur)

pour les alimentations du contrôle-commande, l'informatique...,

- la définition et la mise en œuvre d'une bonne sélectivité des protections propres au réseau de l'utilisateur, pour une élimination rapide des défauts ayant la foudre comme origine,

- l'ilotage préventif, en période d'orage, des consommateurs prioritaires sur un réseau autonome : les charges «sensibles» sont alors alimentées par une production interne à l'établissement, les autres charges continuent à être alimentées par le distributeur public d'énergie.



## normes

L'intérêt des normes est de guider le concepteur d'installation dans :

- les cas de surtension à considérer pour les calculs des contraintes électriques représentatives,
- le choix des niveaux de tenue des matériels (BIL),
- le choix des caractéristiques des dispositifs de protection.

Les principales normes afférentes à ce sujet sont listées en annexe.

Quelques points particuliers sont indiqués ci-après.

### CEI 60-1 : Techniques des essais à haute tension - 1ère partie-

■ section 6 : essais au choc de foudre  
Différentes formes d'onde sont définies (choc de foudre plein, choc de foudre coupé sur front ou sur queue) auxquelles sont associées des durées caractéristiques.

La figure 17 donne l'exemple d'un CdF normalisé.

■ section 8 : essais aux chocs de courant

Pour les essais quatre chocs de courant normalisés de type double exponentielle, fonction de la durée du front et de la durée à mi-valeur sont utilisables :

- choc 1  $\mu$ s / 20  $\mu$ s,
- choc 4  $\mu$ s / 10  $\mu$ s,
- choc 8  $\mu$ s / 20  $\mu$ s,
- choc 30  $\mu$ s / 80  $\mu$ s.

### CEI 694 : Clauses communes pour les normes de l'appareillage à haute tension

(Application française : NF C 64-010)  
Cette norme précise que les niveaux d'isolement assignés doivent être choisis parmi les valeurs indiquées dans des tableaux dont un extrait est donné dans la figure 18.

Elle indique aussi que les essais de tension de choc de foudre doivent être effectués en utilisant l'onde normalisée 1,2 / 50  $\mu$ s.

### CEI 99-1 : Parafoudres - 1ère partie-

(Application française : NF C 65-100)

Section 6 : essais de type

Cette section décrit les essais de type prévus par la norme :

- tenue à l'isolation externe,
- vérification de la tension résiduelle aux chocs de courant de foudre d'une onde 8 / 20  $\mu$ s,
- tenue aux courants de choc de longue durée,

■ essais de fonctionnement, vieillissement accéléré, capacité de dissipation de la chaleur, stabilité thermique, surtension de foudre et de manœuvre,...

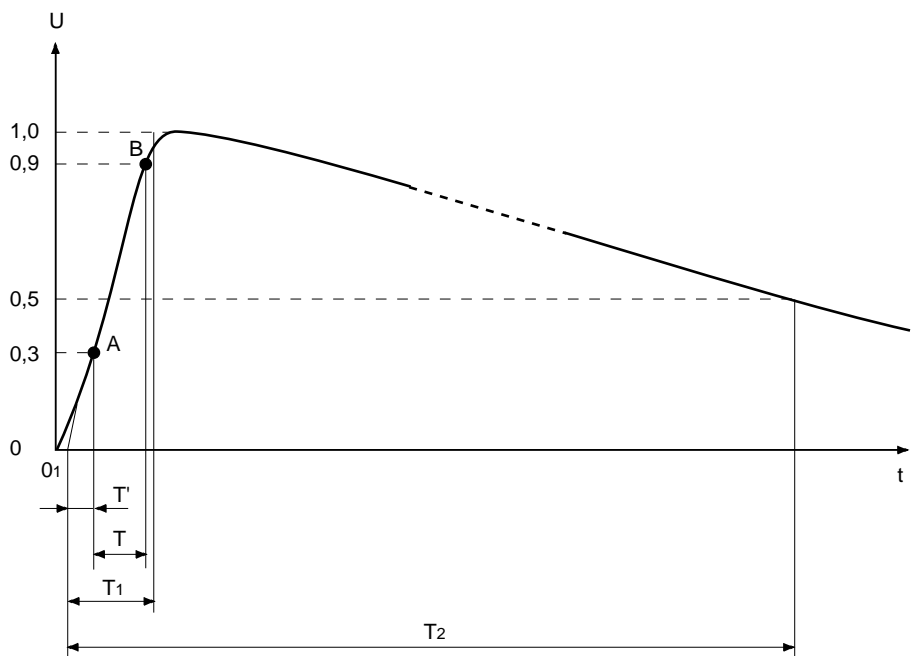
### CEI 71-1 : Coordination de l'isolement - 1ère et 2ème parties-

La tenue diélectrique du matériel aux contraintes de foudre doit être choisie sur la base des surtensions prévues de façon que les exigences de la coordination de l'isolement soient satisfaites. Pour les surtensions de foudre, les principes de coordination peuvent être fondés sur une méthode conventionnelle ou statistique.

■ avec la méthode conventionnelle, le critère de la coordination est la marge

entre la valeur maximale prévisible et la tension de tenue déduite d'un essai au choc. Cette marge détermine un coefficient de sécurité ne devant pas être inférieur à une valeur basée sur l'expérience, de l'ordre de 1,25.

■ avec la méthode statistique, qui admet que des défauts d'isolement puissent se produire, il s'agit de quantifier le risque de défaut. Le critère de la coordination consiste à choisir une marge caractérisée par un facteur de sécurité statistique entre la tension de tenue statistique aux chocs (probabilité de tenue 90 %) et la surtension statistique (probabilité de dépassement 2 %).



$$T_1 = 1,67 T$$

$$T' = 0,3 T_1 = 0,5 T$$

fig. 17 : exemple de CdF normalisé selon CEI 60, ici  $T_1 = 1,2 \mu$ s,  $T_2 = 50 \mu$ s.

tension assignée (kV efficaces)	7,2	24	72,5	245	420	525
niveaux d'isolement assignés	40	95	325	850	1 300	1 425
aux chocs de foudre (kV)	60	125		950	1 425	1 550
		145		1 050		

fig. 18 : exemples de valeurs de tension (selon CEI 694) parmi lesquelles il faut prendre les niveaux d'isolement assignés.

La figure 19 donne, à titre d'exemple, la corrélation entre le risque de défaut et le coefficient de sécurité statistique. Il est à noter qu'actuellement l'emploi de la méthode statistique est pratiquement limité au cas de l'isolation auto régénératrice (défaut n'entraînant pas de dégradation de matériel).

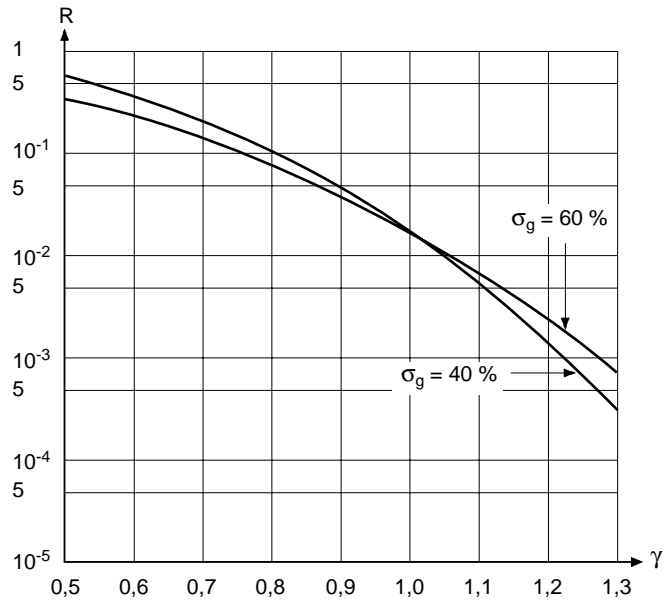


fig. 19 : corrélation entre le risque de défaut ( $R$ ) et le coefficient de sécurité statistique ( $\gamma$ ) pour diverses distributions de surtensions de foudre ( $\sigma_g = \text{écart type}$ ), selon CEI 71.

## 5. exemple d'étude de foudre

Ce chapitre a pour objet d'informer globalement sur la démarche d'une telle étude, la méthode employée, et les conclusions pratiques. En particulier sont successivement présentés la méthode de calcul, la modélisation du poste avec les hypothèses de calcul, les simulations déterministes, l'aspect statistique et les conclusions.

### généralités

L'étude présentée concerne la coordination d'isolement d'un PSEM -Poste Sous Enveloppe Métallique- très haute tension pour lequel il faut s'assurer de la bonne tenue diélectrique des éléments de la chaîne du système électrique. Ces éléments ont des niveaux de BIL différents, et concrètement se pose la question de la nécessité d'adjonction de parafoudres, et de leur définition (emplacement, dimensionnement).

Ce type d'étude tend à se généraliser, dans le cadre de la réalisation de postes importants : les utilisateurs demandent ainsi aux installateurs et fournisseurs de matériel «clés en mains» de justifier quantitativement le bien fondé du dimensionnement des installations.

La réalisation de telles études demeure l'affaire d'équipes d'ingénieurs spécialisés ayant compétence, expérience et savoir-faire suffisants, et disposant de moyens informatiques adaptés.

Nota : l'exemple présenté dans ce chapitre a été établi à partir d'une étude réelle pour la fourniture d'un poste 500 kV, confiée au Service Études de Réseaux (faisant partie de la Direction Technique) par le Département Réalisation d'Ensemble de Merlin Gerin en charge de l'affaire.

### méthode de calcul

Elle met en œuvre plusieurs traitements successifs et complémentaires :

■ premièrement, des calculs déterministes permettent d'évaluer les

contraintes en tension dans l'installation pour différentes valeurs des paramètres influents tels que : type de coup de foudre, intensité et point d'impact de la foudre, présence et emplacement de parafoudre, impédance de terre...

■ deuxièmement, à partir des données statistiques de foudre, un calcul de fréquence de foudroiement et de risque associé,

■ enfin, un résultat sur la tenue du poste en terme de probabilité.

### Déroulement des calculs déterministes

■ modélisation du poste  
Le fonctionnement de chacun des éléments du réseau et leur configuration topologique (leur interconnexion physique réelle), sont décrits par des équations établies à partir des lois électriques qui régissent ces fonctionnements et configurations.

Cette modélisation nécessite une analyse préalable du réseau afin de ne décrire que ce qui est représentatif du problème.

La résolution des équations se fait sur ordinateur à l'aide d'un programme spécialisé, par exemple «EMTP» (Electromagnetic Transient Program).

■ simulation des ondes de courant de foudre et des tensions associées pour chaque solution envisagée.

La résolution pas à pas des équations permet d'exprimer de façon quasi continue l'évolution des variables courant / tension en chaque point du réseau en fonction du temps.

Cette simulation reproduit donc analogiquement ce qui se passe en réalité. La foudre est représentée par une source de courant délivrant une onde triangulaire ou bi-exponentielle dont les durées de front et de queue et la valeur de crête sont ajustables.

### modélisation du poste

Cette modélisation est limitée ici à des descriptions générales suffisantes pour une compréhension globale, sans les détails utiles aux seuls spécialistes.

### Hypothèses générales

■ coup de foudre sur le câble de garde, avec claquage (en retour) d'un isolateur du deuxième pylône de la ligne (position la plus défavorable).

■ onde de foudre sur le câble de garde :

- valeur de crête : 200 kA,
- forme triangulaire : 2 / 50  $\mu$ s.

■ longueur considérée de la ligne foudroyée limitée à  $L = 1,5$  km du poste (cf. chapitre 2).

■ phase contournée :

- la plus éloignée du câble de garde ayant subi l'impact,
- à tension industrielle négligeable.

■ configuration étudiée : schéma d'exploitation du PSEM avec la longueur maximale du jeu de barres en service (cas défavorable).

■ fréquence de modélisation des éléments : 1 MHz.

### Données techniques principales

■ ligne 500 kV :

- 4 câbles par phase, 2 câbles de garde,
- matrice d'impédance :

$$\left( \begin{array}{l} Z_{\text{directe}} \approx 300 \Omega \\ Z_{\text{homopolaire}} \approx 500 \Omega \end{array} \right)$$

■ pylônes :

- impédance caractéristique : 120  $\Omega$ ,
- hauteur : 43 m,
- résistance de terre 25  $\Omega$ .

■ isolateurs :

- chaîne de 29 éléments capot et tige (aussi appelés «assiettes»),
- tension de contournement : 2 600 kV,
- retard à l'amorçage : l'instant du claquage dépend de la forme et de l'amplitude de la surtension selon une courbe typique tension-temps.

■ PSEM :

- impédance caractéristique : 70  $\Omega$ ,
- impédance de prise de terre du poste : < 1  $\Omega$ .

■ capacité :

- transformateurs de puissance : 7 nF,
- transformateurs de mesure : 4 nF.

■ parafoudres : caractéristique  $U = f(I)$  qui exprime la non-linéarité de ces éléments.

■ toutes connexions (hors lignes) : 1  $\mu$ H/m linéaire.

**Schéma étudié**  
(cf. fig. 20)

**simulations déterministes**

Les simulations sont effectuées pour différentes variantes : présence ou non de parafoudres à l'aval du PSEM et aux bornes du transformateur, caractéristiques propres des parafoudres.

Pour chacune d'elles, sont particulièrement observées les surtensions maximales développées au niveau des transformateurs de mesure, du PSEM, et du transformateur de puissance. Ces surtensions sont comparées aux BIL possibles. Les résultats montrent (cf. fig. 21), pour des BIL 1 550 kV, la nécessité d'au moins deux parafoudres (transformateur de mesure, transformateur de puissance).

Le tableau de la figure 21 et les courbes principales de la figure 22 correspondent au cas le plus sécurisant où trois parafoudres identiques sont en service (n° 1, 2 et 3).

Il est intéressant d'observer la répartition du CdF de 200 kA : les lignes et pylônes écoulent l'essentiel du courant alors que seulement moins de 14 kA arrivent au poste, où environ la moitié est absorbée par les parafoudres. C'est donc une fraction très faible du CdF (< 5 %) qui provoque des élévations de tension proches des tenues diélectriques limites des matériels.

Nota : il a été vérifié que les CdF directs sur phase sont moins contraignants que les CdF en retour. En effet, la fonction d'écran du câble de garde limite le courant des CdF directs, calculé selon

le modèle électrostatique, à 12 kA environ.

Ce niveau est inférieur au courant critique, il n'y a donc pas amorçage de la chaîne d'isolateurs. Dans ces conditions les contraintes calculées d'impact direct dans le poste sont inférieures à celles d'impact en retour.

**calcul statistique de la fréquence de foudroiemment et du risque associé**

La fréquence moyenne de foudroiemment de la ligne se calcule en appliquant la formule présentée au chapitre 3 :

$$N_L = Nk \left( \frac{N1}{30} + \frac{l}{70} \right) \cdot \alpha \cdot \frac{L}{100}$$

d'où  $N_L = 1,03$  CdF / an.

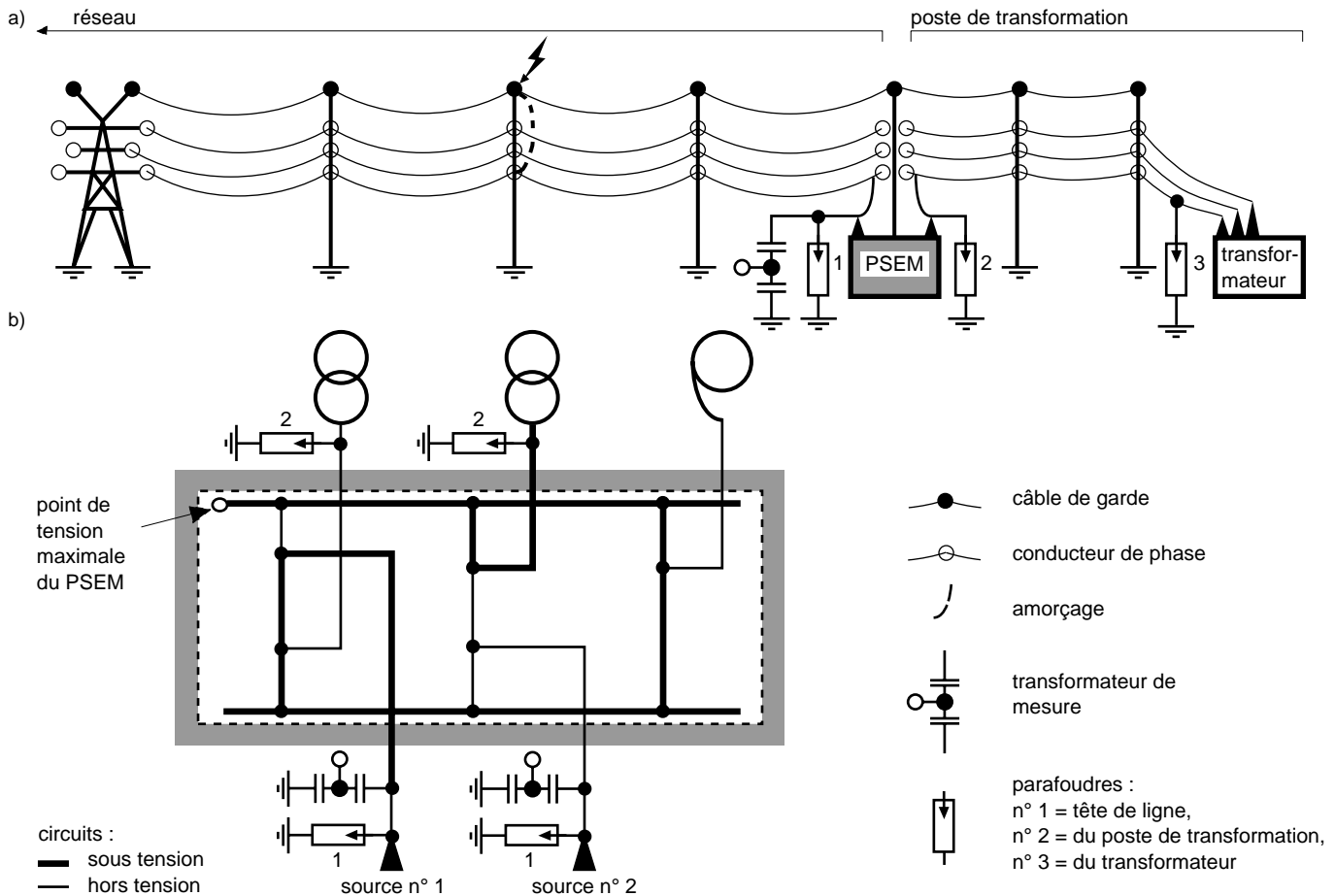
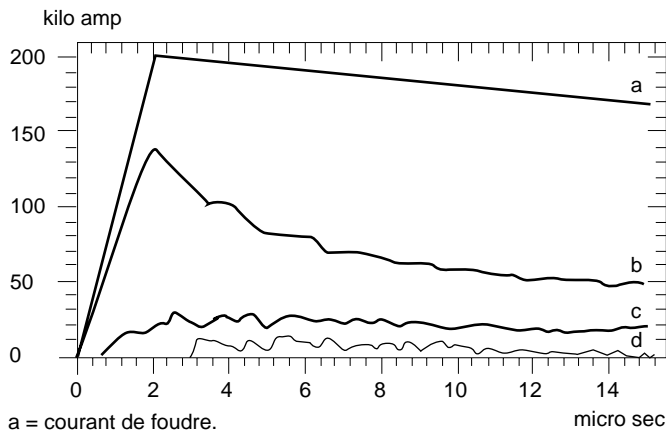


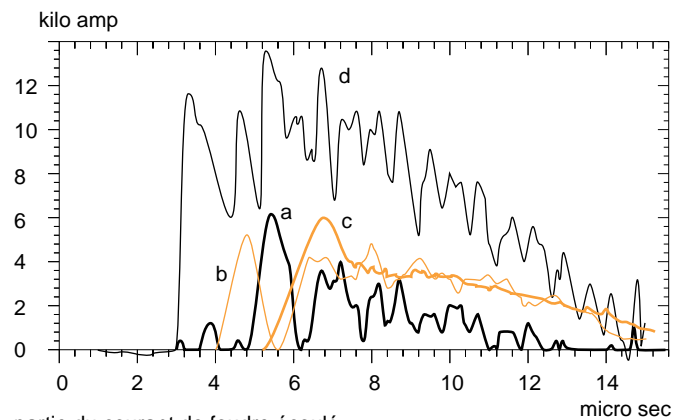
fig. 20 : schéma général et configuration du PSEM.

emplacements des parafoudres			surtensions (kV) et coefficient de sécurité (%) = $\frac{BIL - U_{max}}{U_{max}}$				
à proximité transformateur de mesure de U	en aval du poste blindé	en amont du transformateur de puissance	au niveau de chaque élément				
			transformateur de mesure BIL 1 550 kV	BIL 1 800 kV	PSEM BIL 1 550 kV	transformateur de puissance BIL 1 550 kV	BIL 1 800 kV
oui	oui	oui	1 096 kV		1 103 kV	1 004 kV	
			41,4 %	64,2 %	40,5 %	54,2 %	79,3 %
oui	non	oui	1 263 kV		1 235 kV	1 044 kV	
			22,7 %	42,5 %	25,5 %	48,5 %	72,4 %
oui	oui	non	1 096 kV		1 103 kV	1 560 kV	
			41,4 %	64,2 %	40,5 %	-0,6 %	15,4 %

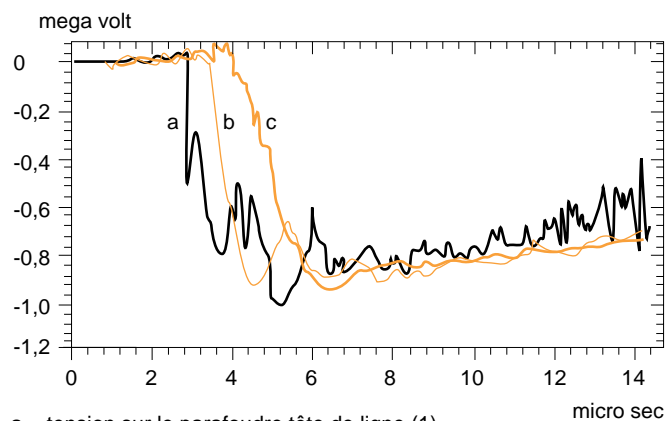
fig. 21 : tableau présentant le coefficient de sécurité de chacun des éléments de l'équipement étudié. La valeur à retenir pour l'ensemble est ici de 40,5 %.



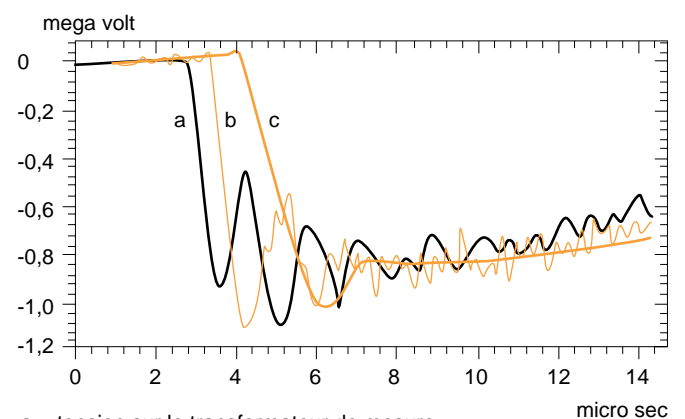
a = courant de foudre.  
partie du courant de foudre écoulé :  
b = vers la terre par le pylône foudroyé,  
c = vers la terre par le dernier pylône de ligne précédent le PSEM,  
d = vers le PSEM par la phase amorcée.



partie du courant de foudre écoulé :  
a = vers la terre par le parafoudre tête de ligne (1),  
b = vers la terre par le parafoudre du PSEM (2),  
c = vers la terre par le parafoudre du transformateur (3),  
d = vers le PSEM par la phase amorcée.



a = tension sur le parafoudre tête de ligne (1),  
b = tension sur le parafoudre du PSEM (2),  
c = tension sur le parafoudre du transformateur (3).



a = tension sur le transformateur de mesure,  
b = tension maximale sur le PSEM -cf. fig. 20-,  
c = tension sur le transformateur de puissance.

fig. 22 : courbes obtenues par simulation de surtensions de foudre.

La fréquence d'apparition des défauts provoqués par des CdF  $\geq 200$  kA est déterminée sur la courbe de la figure 2 :

$$P = 1 \%$$

La fréquence d'occurrence de tels défauts est alors :

$$Fd = N_L \times P \approx 0,01 \text{ défaut / an.}$$

Le temps de retour  $Tr$  c'est-à-dire le temps moyen entre deux défauts est

$$Tr = 1 / Fd \approx 100 \text{ ans.}$$

Une façon pratique d'interpréter ces grandeurs est d'exprimer le risque  $R$  correspondant : celui-ci donne la probabilité d'apparition du phénomène pendant la durée de vie  $t$  du poste.

$$R = 1 - e^{-\frac{t}{Tr}}$$

Soit pour 30 ans :  $R \approx 26 \%$ .

## interprétation de ces calculs

La conclusion de cette étude sous une forme synthétique s'exprime en une phrase : il y a une chance sur quatre (26 %) pour que pendant la vie du poste (30 ans), une surtension due à la foudre atteigne ou dépasse 1 103 kV correspondant à 71 % du BIL défini (1 550 kV), soit un coefficient de sécurité calculé de 40 %.

Ce résultat aide alors à définir les niveaux de protection des matériels, en l'interprétant selon les normes, l'état de l'art, les contraintes économiques...

Notons que tous ces calculs résultent d'un choix de valeurs des paramètres influents. Parmi ceux-ci :

■ certains sont déterminants (par exemple : impédances de terre des

pylônes et des postes, amplitudes des CdF),

■ et/ou ont une plage de dispersion très large (par exemple : tension de claquage et retard à l'amorçage des isolateurs),

■ et/ou sont mal connus (par exemple : statistiques de configuration de réseau, corrélation entre amplitudes et fronts des ondes de foudre),

■ et/ou sont négligés (par exemple : processus de vieillissement et effet couronne).

Le choix de ces valeurs peut donner à penser que les résultats sont imprécis. En fait, les retours d'expérience principalement analysés par les distributeurs d'énergie confirment ces choix a posteriori : ainsi, la méthodologie de l'exemple donné dans ce chapitre est proche des pratiques d'EDF.

## 6. conclusion

Ce document fait une courte synthèse sur la question de la foudre dans les installations électriques, et constitue une initiation élémentaire sur ce sujet en général mal connu et devenu important.

Il vise principalement les installations haute et moyenne tension : la foudre constitue de fait un facteur très contraignant pour les matériels et déterminant pour la maîtrise de la coordination de l'isolement.

En basse tension, la foudre ne constitue qu'un volet parmi toutes les perturbations électriques existantes (cf. bibliographie).

Dans ce Cahier Technique, les principaux aspects utiles ont été abordés, en essayant de donner le maximum d'informations sur les plans qualitatif et quantitatif : connaissance de la foudre, ses effets sur les installations électriques, les moyens de protection opérationnels actuels, les normes.

Mais de l'ensemble du document, deux développements particuliers sont à retenir :

- la notion de distance de protection de parafoudre, liée au phénomène de la propagation d'ondes à fréquences très élevées (MHz),
- un exemple, présenté à partir d'une étude réalisée par Merlin Gerin pour

une installation très haute tension. Cet exemple qui décompose la procédure d'une «étude de foudre» montre comment peut être quantifié le risque de destruction d'un matériel par la foudre.

Le monde de l'électrotechnique commence à être assez bien sensibilisé au problème de foudre, et de telles études tendent à se systématiser dans le cadre des grands projets internationaux.

La tendance actuelle à considérer le phénomène de foudre dès la conception des installations, ne peut que croître, et ainsi contribuer à une meilleure qualité de l'énergie électrique.

## annexe : bibliographie

### Normes

- CEI 56 : Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension.
- CEI 60-1 : Techniques des essais à haute tension - 1ère partie - (Application française : NF C 41-101 et 102).
- CEI 71 : Coordination de l'isolement (Application française : NF C 10-100).
- CEI 76-1 : Transformateurs de puissance - 1ère partie : Niveaux d'isolement et essais diélectriques - (Application française : NF C 52-100, partie 3).
- CEI 99-1 : Parafoudres - 1ère partie - (Application française : NF C 65-100).
- CEI 289 : Bobines d'inductance (Application française : NF C 52-300).
- CEI 298 : Appareillages sous enveloppe métallique pour réseaux à courant alternatif de tensions assignées comprises entre 1 et 52 kV (Application française : NF C 64-400).
- CEI 694 : Clauses communes pour les normes de l'appareillage à haute tension (Application française : NF C 64-010).
- NF C 17-100 : Protection contre la foudre - Installation de paratonnerres : règles.

### Spécifications EDF

- Série HN 65 :
- protection contre les surtensions en haute tension,
  - éclateurs en haute tension,
  - parafoudres en haute tension.
- HN 112 : Coordination d'isolement du réseau 400 kV.
- HN 115 : Principes de conception et de réalisation des mises à la terre.
- HN 119 : Coordination d'isolement du réseau 225 kV.

### Publications diverses

- Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions. Collection EDF.
- «La foudre : la comprendre pour s'en protéger.» Nathan éditeur.
- Traité d'électricité. Volume 22 : haute tension. Ecole polytechnique de Lausanne - EPL
- Les perturbations électriques et électromagnétiques. CIGRE, Revue Electra.
- Editions des techniques de l'ingénieur.
- Overvoltage and Insulation Coordination CIGRE, Comité 33.

### Cahiers Techniques Merlin Gerin

- La protection des fileries BT contre les perturbations électromagnétiques dans les postes HT et THT. Cahier Technique n° 137 B. CAVALADE.
- Les perturbations électriques en BT Cahier Technique n° 141 R. CALVAS.
- La CEM : la compatibilité électromagnétique. Cahier Technique n° 149 F. VAILLANT.
- Surtensions et coordination de l'isolement Cahier Technique n° 151 D. FULCHIRON.
- Calcul des courants de court-circuit Cahier Technique n° 158 B. DE METZ NOBLAT et G. THOMASSET.