

# Foudre et protection des bâtiments

par **Alain ROUSSEAU**

*Ingénieur de l'École centrale de Lyon  
DEA de Génie électrique  
Directeur Produits ERICO*

**Claude GARY**

*Ingénieur de l'École supérieure d'électricité  
Conseiller scientifique honoraire d'Électricité de France*

et **Gérard BERGER**

*Ingénieur de l'École supérieure d'électricité  
Docteur ès sciences  
Chargé de recherches au CNRS*

<b>1. Physique des phénomènes orageux : données actuelles.....</b>	<b>C 3 307 - 2</b>
<b>2. Mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique .....</b>	<b>— 9</b>
<b>3. Effets de la foudre .....</b>	<b>— 13</b>
<b>4. Conception générale d'une installation de protection .....</b>	<b>— 14</b>
<b>5. Installation de protection extérieure.....</b>	<b>— 14</b>
<b>6. Installation de protection intérieure .....</b>	<b>— 17</b>
<b>7. Paratonnerres à dispositifs d'amorçage et tests associés.....</b>	<b>— 20</b>
<b>8. Conclusion .....</b>	<b>— 21</b>
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. C 3 307</b>

**L**orsque Benjamin Franklin inventa, en 1753, le paratonnerre à tige, il pensait que, par son effet de pointe, celui-ci était capable d'écouler à la terre le « fluide électrique » contenu dans le nuage orageux, et, par là, d'empêcher la foudre de tomber.

## Généralités sur la protection contre la foudre

Cette hypothèse, encore admise par certains il n'y a pas si longtemps, ne résiste pas à l'analyse que permet la connaissance moderne des phénomènes d'ionisation. D'ailleurs, cette façon de voir fut rapidement infirmée, déjà du temps de Franklin : parmi les nombreuses tiges qu'il fit élever, cinq furent frappées par la foudre dès la première année de leur mise en place.

La seconde façon d'expliquer le rôle protecteur des paratonnerres consiste alors à considérer leur pouvoir d'attraction sur la foudre. On a cependant assez rapidement reconnu que ce pouvoir était limité à un volume relativement réduit, ce qui permet néanmoins d'assurer une certaine **zone de protection** autour du paratonnerre. Diverses définitions de cette zone, toutes empiriques, ont été données, généralement sous la forme d'un cône de section circulaire, d'axe vertical, et dont le sommet coïncide avec la pointe du paratonnerre. On a longtemps admis que le demi-angle au sommet de ce cône devait être de l'ordre de 45 ou 60°. On a également représenté le contour de la zone protégée par une surface de révolution dont la génératrice était un arc de cercle tangent à la fois à la tige du paratonnerre en son sommet et à la surface au sol.

Malheureusement, ces divers modèles de protection sont encore imparfaits, car ils ne prévoient pas certains cas extrêmes. On connaît, en effet, de nombreux cas où la foudre est tombée au pied même du paratonnerre ou d'une tour élevée, ou a frappé cette tour à mi-hauteur. Ces observations ont notamment été faites auprès de tours de télévision et semblent même montrer que la concentration d'impacts est, à leur voisinage, supérieure à la moyenne de la région.

Ces exemples montrent qu'une protection parfaite contre la foudre est illusoire. Le risque encouru doit être maîtrisé. Nous montrerons dans cet article que, dans le cas où une protection absolue est nécessaire, la seule solution consiste à entourer l'objet à protéger par une cage de Faraday, à moins que l'objet ne soit lui-même en métal conducteur. Cependant, l'application qui est faite de la cage de Faraday pour la protection directe contre la foudre, **la cage maillée**, a une efficacité qui varie en fonction de la dimension des mailles. Parallèlement, ces dernières années ont vu apparaître de nouveaux paratonnerres [appelés PDA (paratonnerre à dispositif d'amorçage)] qui sont réputés plus efficaces que les tiges de type Franklin.

L'étude des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre a permis d'élaborer une méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale, ou de fils tendus horizontalement ; elle permet également de définir la taille maximale des mailles d'une cage. Cette méthode est fondée sur l'analyse du **mécanisme d'impact de la foudre** et est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé **modèle électrogéométrique**. Bien que ce modèle ne soit pas parfait – bien des incertitudes subsistent – il constitue néanmoins l'approche la plus cohérente pratiquement de la **protection directe** contre la foudre qui ait été élaborée à ce jour. Il permet entre autres d'expliquer pourquoi la foudre peut tomber au pied d'une tour, donc d'expliquer certains « ratés » de protection, et montre que la **zone de protection dépend de l'intensité de crête du courant qui va s'écouler par le coup de foudre**.

Mais, afin de pouvoir développer ce modèle et d'en préciser des applications, il est nécessaire d'étudier les phénomènes orageux et d'examiner les paramètres principaux qui caractérisent la foudre. Ce sera l'objet de la première partie de cet article.

Ce qui vient d'être dit concerne la conception traditionnelle de la protection des bâtiments et des édifices par paratonnerre ou cage maillée, qui a pour fonction d'éviter les dégâts par coups de foudre directs, et qu'il est convenu de désigner par « **protection extérieure** ».

Mais aujourd'hui, il existe une très nette tendance à insister, parallèlement, sur la nécessité d'installer une « **protection intérieure** ». En effet, depuis une dizaine d'années, les équipements électriques, l'informatique, l'audiovisuel, les télécommunications envahissent tous les domaines de l'activité humaine, comme l'industrie, l'artisanat, le tertiaire, la domotique. Le développement accéléré de ces techniques, dont les équipements ont une vulnérabilité extrême aux effets de la foudre, a induit la nécessité de nouvelles recherches sur les phénomènes orageux et sur les moyens pour se protéger contre leurs effets néfastes. Cet aspect de la protection sera également largement traité dans la deuxième partie de cet article.

## Conception générale d'une installation de protection contre la foudre

## 1. Physique des phénomènes orageux : données actuelles

Nous examinerons les quatre aspects suivants de la décharge atmosphérique :

- distribution statistique des orages,
- phénomènes précurseurs,
- déroulement d'un coup de foudre,
- paramètres électriques de la foudre.

### 1.1 Distribution statistique des orages. Sévérité orageuse

#### 1.1.1 Niveau kéraunique

Il est d'usage universel de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau kéraunique (keraunos = foudre en grec).

On rappelle que celui-ci est, par définition, le **nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu**. La simplicité même de cette définition a permis l'établissement de statistiques, à partir de renseigne-

ments fournis par le passé par les bonnes volontés locales et aujourd'hui par la Météorologie nationale, qui rendent d'appréciables services. Cependant, cette donnée est peu précise.

En France, le niveau kéraunique moyen  $N_i$  est de 22. Il est supérieur à 30 dans les régions montagneuses des Alpes, du Massif central et des Pyrénées et compris entre 10 et 20 dans les régions côtières de la Manche et de l'Atlantique.

Dans d'autres régions du globe, ce niveau peut être considérablement plus élevé : il est, par exemple, de l'ordre de 100 en Floride (États-Unis) et dépasse 180 dans certaines régions d'Afrique du Sud ou en Indonésie.

La figure 1 présente la carte des niveaux kéraoniques en France. Cette présentation en secteurs centrés sur les stations d'observation a été proposée par Électricité de France ; elle est bien mieux adaptée au calcul du risque de foudroiement que la présentation habituelle sous forme de courbes isokéraoniques.

### 1.1.2 Définition du foudroiement

Il est évident que la notion de niveau kéraunique est trop rudimentaire pour pouvoir fournir une mesure utilisable de la sévérité orageuse, car elle ne donne aucune indication sur l'existence des zones localisées particulièrement foudroyées et encore moins sur l'intensité des coups de foudre.

Une définition bien plus rigoureuse de la sévérité orageuse peut être atteinte par la sévérité du foudroiement, par exemple la densité de coups de foudre au sol, exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an.

À partir des résultats fournis principalement par des compteurs de foudre spéciaux, plusieurs chercheurs ont tenté d'élaborer des formules reliant le niveau kéraunique  $N_i$  et la densité  $N_S$  de coups de foudre au sol par kilomètre carré et par an. Une formule simple, qui donne satisfaction pour les conditions orageuses existant en France, est :

$$N_S = N_i / 10$$

Cependant, il faut noter que cela ne représente encore qu'une moyenne ne tenant pas compte des particularités topographiques.

### 1.1.3 Densité réelle de coups de foudre

Aujourd'hui, des systèmes de détection d'orages plus précis peuvent donner des informations intéressantes. La densité de coups de foudre au sol est ainsi déterminée avec plus de précision et des informations sur l'amplitude de ces coups de foudre sont aussi disponibles. Bien que ces systèmes soient en évolution (moyens matériels, nombre de capteurs, durée totale de fonctionnement...), les valeurs qu'ils fournissent sont nettement plus précises que n'importe quelles cartes de niveau kéraunique par région météorologique (cf. figure 1). Un tel système existe dans de nombreux pays d'Europe ainsi qu'au Japon, aux États-Unis, en Australie... En France, le système s'appelle Météorage et sera décrit au paragraphe 1.1.5.1.

**Exemple :** la figure 2 présente le nombre d'impacts sur la France le 6 août 1999 entre 0 h et 24 h.

### 1.1.4 Facteurs locaux influant sur le foudroiement

On peut se demander s'il existe des zones localisées particulièrement foudroyées communément appelées **nids d'orages**.

L'existence de ces zones est souvent rapportée par la population locale, par les *on-dit*, mais n'a jamais fait l'objet de statistiques sérieuses. Que faut-il en penser, à la lumière des connaissances

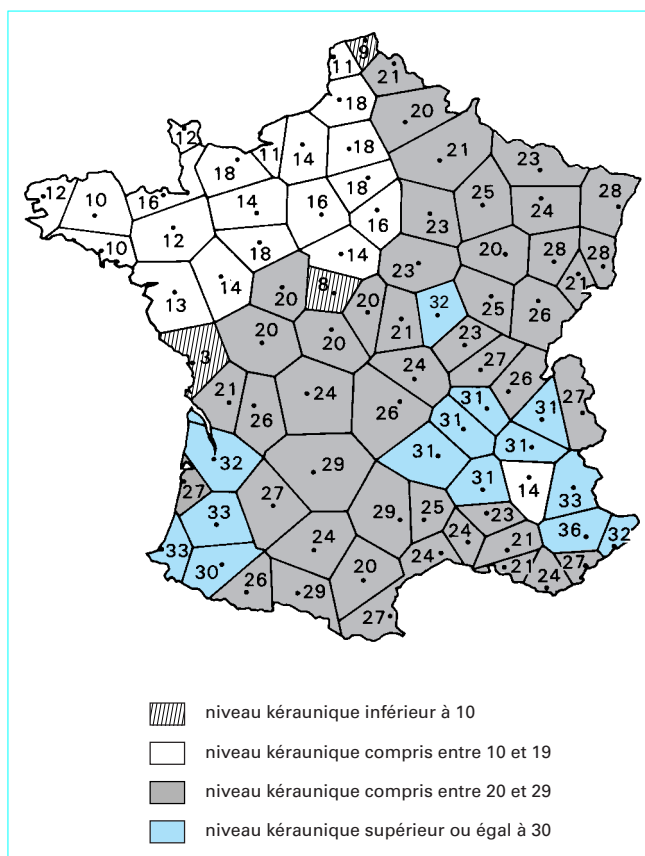


Figure 1 – Carte des niveaux kéraoniques en France. Moyenne sur 5 ans [3]

actuelles ? On peut raisonnablement songer à trois facteurs locaux possibles.

#### Facteurs topologiques

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation des nuages orageux, sous l'effet combiné du sol et d'un réchauffement local ; il y a alors formation puis ascension d'une masse d'air chaud et humide. Comme l'air transmet très mal la chaleur, cette *bulle* chaude s'élève, pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant, et forme un nuage orageux aux altitudes où la condensation commence. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé.

Par ailleurs, des mouvements d'air, canalisés par des vallées ou des fleuves, et qui entraînent les nuages orageux, favorisent l'existence de couloirs orageux. Ainsi, ce ne sont pas toujours les points les plus élevés qui sont le plus frappés par la foudre. En montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets.

#### Facteurs géologiques

Certains facteurs locaux pourraient avoir un pouvoir attractif sur la foudre : on a parlé de failles, de nappes d'eau.

Nous verrons (§ 2) que le point d'impact exact d'un coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie la plus inférieure de sa trajectoire ; la partie supérieure, disons au-delà d'une centaine de mètres au-dessus du sol, se développe de façon totalement indépendante de la structure géométrique ou géologique de ce dernier. Ce ne sont donc que des facteurs tout à fait locaux qui peuvent avoir

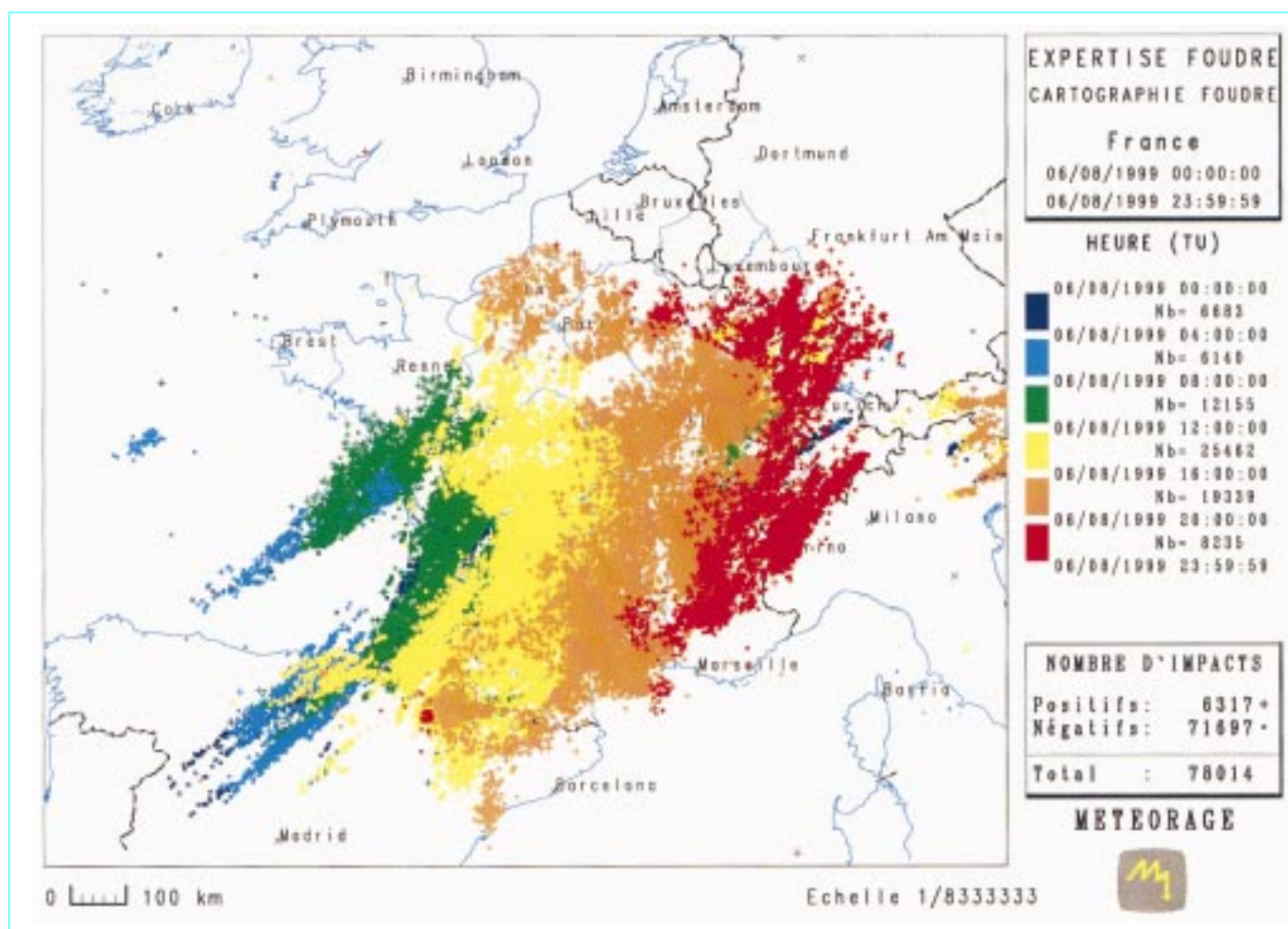


Figure 2 – Statistiques de foudroiement sur la France le 6 août 1999 (d'après Météorage)

une action sur la décision de l'impact. La présence de saillies, arbres, bâtiments, cheminées est bien connue comme étant l'un de ces facteurs. Mais la conductivité des sols pourrait être un autre facteur important. Cette hypothèse repose sur un certain nombre d'observations concernant le foudroiement des lignes à haute tension, ainsi que sur les résultats de recherches de laboratoire. Ces résultats permettraient d'allouer aux failles humides, aux nappes d'eaux, à des terrains marécageux, une certaine attirance préférentielle pour la foudre ; leur zone d'action ne saurait toutefois excéder une centaine de mètres au-delà de leur contour.

#### ■ Concentration ionique de l'air (conductivité de l'air)

La concentration en ions de l'air (ou sa conductivité, celle-ci étant la conséquence de celle-là) a parfois été invoquée pour expliquer un nid d'orages. Mais, même aujourd'hui, il n'existe pratiquement pas de données expérimentales à partir d'observations sur le terrain. Les études de laboratoire sur les mécanismes de décharge dans l'air n'ont pas mis en évidence, jusqu'à présent, un effet de cette conductivité, par exemple en favorisant le trajet de la décharge ; les théories actuellement disponibles montrent d'ailleurs que le taux d'ions dans l'air devrait être considérablement plus élevé que ce que l'on peut mesurer dans les conditions naturelles pour qu'un effet sensible puisse se manifester.

### 1.1.5 Détection de la foudre

Deux principaux systèmes de détection de la foudre existent aujourd'hui en France : Météorage et Safir. Ils ne fournissent toutefois pas les mêmes informations et ne sont pas fondés sur les mêmes principes de détection.

#### 1.1.5.1 Météorage

Ce réseau national est opérationnel depuis 1987 et couvre l'ensemble du territoire français (cf. figure 2). Il est composé de 16 capteurs qui détectent les impacts de foudre nuage-sol grâce à l'onde électromagnétique émise et envoient leurs informations à un centre de traitement en temps réel. Cela permet de surveiller le développement et le déplacement des masses orageuses. En outre, la compilation des paramètres physiques des éclairs, leur datation et leur localisation permettent la constitution d'une base de données.

Deux possibilités s'ouvrent donc :

— la gestion du risque foudre, par l'anticipation en temps réel (déconnexion d'appareils ou de process, passage sur groupe électrogène...) ;



— la création de base de données sur les amplitudes et les densités de coups de foudre, plus fiables que les données compilées jusqu'à présent.

Tenant compte de l'aspect aléatoire des impacts au sol, une carte de niveaux kérauniques n'a de sens que si les données recueillies sont moyennées sur une période de plusieurs années. Par exemple, la carte présentée sur la figure 1 couvre une période d'observations de 5 années. Dans l'avenir, les données Météorage conduiront à l'établissement de cartes de plus en plus précises, établies sur de longues périodes (à l'instar des cartes du type de la figure 1 mais qui couvrent en général une période de 20 ans). Ces données Météorage, établies à partir de stations localisées tous les 200 km environ, autorisent grâce à des perfectionnements récents une précision moyenne de localisation du point d'impact meilleure que 1 km.

Dans le cas d'une éventuelle contradiction entre les données globales (du type de la figure 1) et les données Météorage (locales), il convient de retenir la valeur maximale de densité de coup de foudre au sol, par souci de sécurité.

### 1.1.5.2 Safir

Safir correspond à une utilisation régionale ou nationale de détection précoce d'orages et de leurs conséquences (foudroiement, grêle...).

Dans ce cas, c'est l'activité électrique produite par le nuage qui est analysée, en particulier les éclairs intranuages qui précèdent les éclairs nuage-sol de 5 à 35 min environ. La détection de cette activité intranuage multiplie (facteur de multiplication annoncé comme étant en général de l'ordre de 100 à 1 000) les capacités de détection dues aux simples impacts au sol.

Safir est aussi constitué d'un réseau de stations de détection et d'une station centrale de traitement. L'écartement des stations de détection est environ de 100 km et l'activité est analysée en temps réel avec une résolution de 1 km environ. Safir donne aussi une information sur les décharges au sol ainsi que sur leur amplitude, temps de montée et temps de descente. Il correspond davantage à un principe de surveillance permettant d'avoir une action locale face à une menace foudre ou orageuse (forte précipitation, grêle, cisaillement de vent) déterminée de façon très précise et est utilisé, par exemple, par certains aéroports.

## 1.2 Phénomènes précurseurs

### 1.2.1 Nuage orageux

Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement du type cumulo-nimbus, occupant une surface de quelques dizaines de kilomètres carrés, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres. Leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure, de particules de glace à leur partie supérieure. Leur base se trouve à environ 2 à 3 km au-dessus du sol, et ils se développent, en hauteur, jusqu'à des altitudes de 10 à 15 km.

On distingue deux sortes de structures orageuses, les orages de chaleur, très localisés, et les orages frontaux, qui peuvent se déplacer sur des centaines de kilomètres. Lorsque ces structures se forment, entrent toujours en jeu des conflits entre masses d'air chaud et humide et masses d'air froid.

Pour expliquer ce qui se produit, nous retiendrons, à titre d'exemple, la formation des orages de chaleur, dits aussi de convection. Sous l'effet combiné de l'humidité et d'un réchauffement local du sol, il se forme une « bulle » d'air chaud et humide qui va s'élever et qui est pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant.

Cette bulle formera un nuage orageux aux altitudes où la condensation commencera.

Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation et un transfert de charges électriques au sein du nuage. Sans entrer dans le détail de ces processus d'électrisation, extrêmement complexes, où interviennent des effets triboélectriques de frottement entre gouttes et air ainsi que des processus de brisement des gouttes, nous dirons seulement que le résultat net est que la partie supérieure des nuages orageux, constituée de cristaux de glace, se charge positivement, tandis que leur base se charge négativement. On observe souvent un îlot de charges positives enserré dans la masse négative.

Lorsque le nuage est mûr pour éclater en orage, il constitue ainsi un vaste dipôle électrique, créant des champs électriques intenses entre les différentes couches intérieures, de même qu'entre sa base et la surface de la terre. Ces champs sont la source nécessaire à la formation de décharges électriques, qui peuvent être soit des décharges intranuages soit la foudre proprement dite, qui jaillit entre le nuage et la terre. Notons qu'il existe en permanence, dans l'atmosphère, un champ électrique faible qui, mesuré sur un terrain plat et par beau temps, est de l'ordre de 100 à 150 V/m. La figure 3 schématise la structure électrique d'un cumulo-nimbus orageux.

Au moment de la formation ou de l'approche d'un nuage chargé, sous l'influence des charges négatives qui sont disposées à sa base, et dont l'effet devient prépondérant, le champ électrique au sol commence à s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsque son intensité atteint  $-10$  à  $-15$  kV/m, on peut dire qu'une décharge au sol est imminente. Cette inversion, puis cette forte croissance du champ électrique, est donc le premier signe annonçant la chute probable de la foudre.

Le signe négatif résulte de la convention de sens choisie pour le champ au sol : le champ est négatif lorsque le sol est positif par rapport à l'atmosphère.

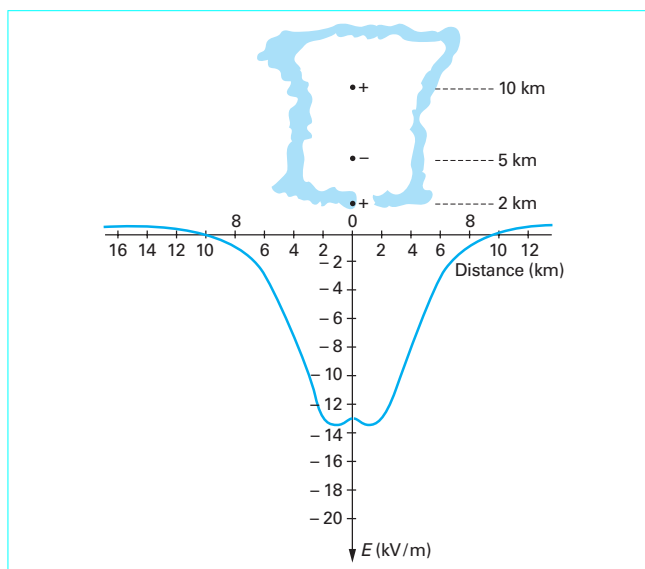


Figure 3 – Nuage orageux et champ électrique qu'il crée au sol [3]

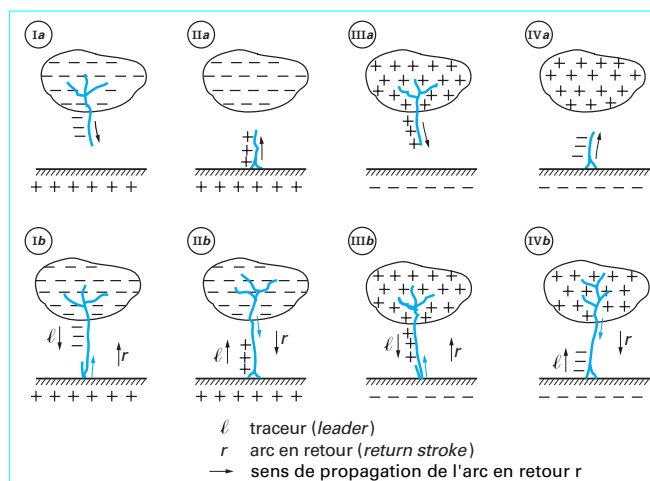


Figure 4 – Différents types de coups de foudre selon la classification due à K. Berger [1]

## 1.2.2 Effet couronne au sol

Les valeurs de champ électrique au sol indiquées précédemment supposent un sol horizontal plat. Or, on sait que toute aspérité, par un effet de concentration des lignes de champ électrique, peut considérablement augmenter le champ local. On peut calculer qu'au sommet d'une demi-sphère posée sur un plan le champ est le triple du champ moyen. Lorsque la demi-sphère se déforme pour devenir un demi-ellipsoïde pointu, cet effet s'accroît encore.

Ainsi, pour un rapport entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un facteur 300. Comme le seuil d'ionisation de l'air atmosphérique est de l'ordre de 25 kV/cm, on voit que, dans ces conditions particulières, il suffit d'un champ ambiant d'une dizaine de kilovolts par mètre pour provoquer un effet de couronne au sommet de l'ellipsoïde. Ce phénomène a été observé dès l'Antiquité sur des extrémités de lances et autres objets pointus et était également connu des marins sous le nom de feu de Saint-Elme, alors qu'il se produisait au bout des mâts des bateaux.

Il est aussi connu des alpinistes, qui savent que son apparition signifie danger immédiat et qu'il convient alors de s'éloigner rapidement des cimes.

## 1.3 Déroulement d'un coup de foudre

### 1.3.1 Classification des coups de foudre

On classe tout d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur (ou premier leader) :

- coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage) ;
- coups de foudre ascendants (développement du traceur à partir du sol).

En pays plat, le coup de foudre de loin le plus fréquent est descendant. Pour qu'un coup ascendant puisse se développer, il faut (§ 1.3.3) la présence d'une proéminence importante, telle qu'une tour élevée ; c'est aussi la raison pour laquelle le coup ascendant se produit plus fréquemment en montagne.

En second lieu, on classe les coups de foudre selon leur polarité :

- coups de foudre négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement) ;
- coups de foudre positifs (décharge d'un nuage chargé positivement).

Dans nos régions à climat tempéré, 90 % des coups de foudre sont négatifs.

La figure 4 résume cette classification selon K. Berger [1].

Les schémas **I a** et **I b** sont relatifs au coup de foudre descendant négatif, de loin le plus fréquent en plaine. Les schémas **II a** et **II b** sont relatifs au coup de foudre ascendant écoulant une charge négative du nuage. Les schémas **III a** et **III b** sont relatifs au coup positif descendant, écoulant une charge positive du nuage. Enfin, les schémas **IV a** et **IV b** sont relatifs au coup ascendant, écoulant une charge positive du nuage ; ce type de coup est rare.

Dans ce qui suit, nous allons décrire le déroulement des coups les plus fréquents, du type I, II et III.

### 1.3.2 Coup de foudre descendant

La première phase d'un coup de foudre descendant est une pré-décharge faiblement lumineuse ou traceur qui se propage du nuage vers le sol en progressant par bonds de quelques dizaines de mètres (c'est le **traceur par bonds** ou *stepped leader*, suivant la terminologie anglo-saxonne). Il y a entre les bonds des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100  $\mu$ s, de sorte que sa vitesse de progression moyenne est comprise entre 0,15 et 0,50 m/ $\mu$ s. Au fur et à mesure que ce traceur progresse, il se ramifie et la luminosité du chemin ionisé s'accroît.

Dès que la tête d'un traceur par bonds approche le sol, des pré-décharges ascendantes se développent à partir de celui-ci, généralement depuis un arbre, une saillie, dans la direction du traceur.

Nous détaillerons ce phénomène au paragraphe 2 traitant le mécanisme d'impact, car c'est sur son analyse que reposent tous les modèles récents de protection contre la foudre. Disons ici que, lorsque l'une de ces pré-décharges ascendantes et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un pont conducteur, entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant à forte intensité. Ce courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui, en remontant le canal ionisé formé par le traceur, neutralisent les charges de ce dernier ; on observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage avec une vitesse estimée à  $10^8$  m/s : c'est l'**arc en retour** (en anglais : *return stroke*) (figure 5).



Figure 5 – Coup de foudre descendant (photo A. Hermant)

Un coup de foudre est, en général, composé de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé. Le processus en est le suivant :

- lorsque le courant de la première décharge a cessé de s'écouler, il peut se passer environ 100 ms avant qu'une deuxième décharge apparaisse, le nuage pouvant contenir encore une certaine quantité de charges. Cette deuxième décharge commence par l'apparition d'un traceur qui, contrairement au traceur par bonds, progresse de façon continue, c'est le **trait flèche** (en anglais : *dart leader*) dont la vitesse de propagation est de l'ordre de  $10^6$  m/s ;
- il est également suivi d'un arc en retour ;
- plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu, selon ce type de mécanisme.

En général, un coup de foudre complet dure de 0,2 à 1 s et comporte en moyenne quatre décharges partielles. La première décharge est souvent la plus importante en amplitude, bien que ce ne soit pas une règle générale. Dans l'intervalle entre les décharges qui sont impulsionnelles, un faible courant, de l'ordre d'une centaine ou d'un millier d'ampères, continue à s'écouler par le canal ionisé : c'est le *courant persistant* (ou encore courant de suite ou courant continu) qui écoule souvent la plus grande partie de la charge totale d'un coup de foudre (§ 1.4.2).

Quant au coup de foudre descendant positif, il se déroule de manière tout à fait semblable, mais n'est constitué que d'un seul arc en retour, toutefois de durée beaucoup plus longue, et est de ce fait responsable en général de dégâts plus importants.

### 1.3.3 Coup de foudre ascendant

Si l'effet couronne reste faible et circonscrit au voisinage immédiat de la pointe d'un paratonnerre, la décharge peut, en revanche, se développer beaucoup plus loin lorsque les dimensions de l'objet sont importantes. Dans certains cas, tels que pylônes placés sur une crête, tour élevée, elle peut se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage. Il se produit alors un véritable coup de foudre, que l'on désigne par coup de foudre ascendant (figure 6). De tels coups ascendants sont fréquemment observés à partir de tours de télévision modernes, dont la hauteur dépasse 300 m, à partir de gratte-ciel (observations à l'Empire State Building), et à partir de pics montagneux.



Figure 6 – Coup de foudre ascendant (photo H. Binz)

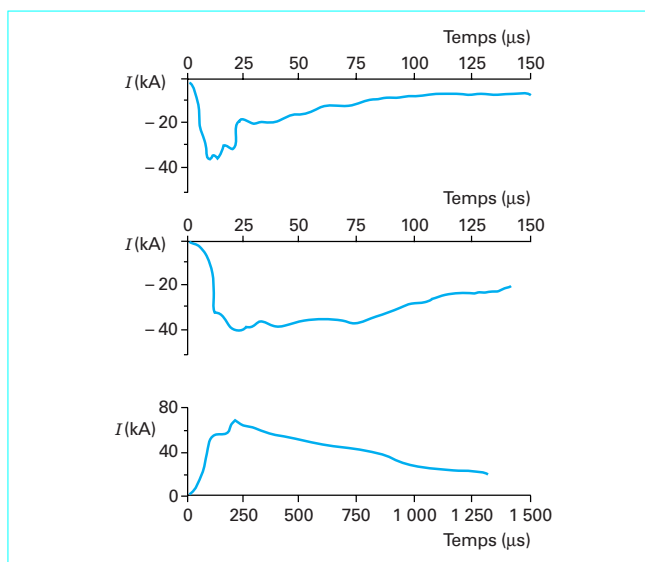


Figure 7 – Courants de foudre négatifs et positifs mesurés au mont San Salvatore à Lugano (Suisse)

Notons cependant que ce mécanisme est plus probable en décharge positive, c'est-à-dire lorsqu'un nuage négatif induit des charges superficielles positives dans le sol.

## 1.4 Paramètres électriques de la foudre

### 1.4.1 Formes des composantes impulsionnelles (décharges) d'un coup de foudre

#### ■ Formes des décharges négatives

Les coups de foudre négatifs offrent une très grande variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants *continus* (ou *persistants*), chacun d'entre eux ayant des amplitudes et des durées diverses. La durée de front de la première décharge partielle est de l'ordre de 5 à 15  $\mu$ s ; la durée de queue est de l'ordre d'une centaine de microsecondes. Pour les décharges secondaires, la durée de front est très courte, inférieure à 1  $\mu$ s, mais la queue d'onde est bien plus régulière que dans la première décharge.

Les courants de foudre négatifs, bien qu'ayant une amplitude en général plus faible que les courants de foudre positifs, présentent une raideur de front beaucoup plus grande. Pour 50 % des coups de foudre négatifs, la raideur de front est supérieure à 20 kA/ $\mu$ s, alors que, pour les coups de foudre positifs, la moyenne est de 2 kA/ $\mu$ s.

#### ■ Formes des décharges positives

Le coup de foudre positif est constitué d'une seule décharge qui dure de 0,1 à 0,2 s. La durée du front de l'onde est relativement longue, elle varie entre 20 et 200  $\mu$ s, mais l'amplitude du courant peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 100 kA.

La figure 7 présente quelques formes de courants de foudre. Ces courants ont été enregistrés à la station d'étude de la foudre du mont San Salvatore, en Suisse.

#### ■ Formes d'ondes de foudre en laboratoire

Il est intéressant de noter qu'en laboratoire les courants de foudre positifs ou négatifs sont simulés par des ondes biexponentielles de forme 8/20 ou 4/10.

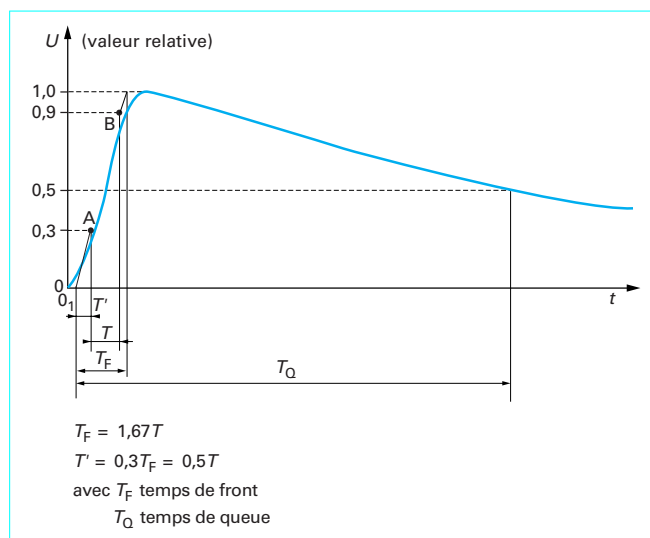


Figure 8 – Choc de foudre en laboratoire

Une onde biexponentielle est caractérisée par une équation du type :

$$I = k (e^{-At} - e^{-Bt})$$

avec  $k$ ,  $A$  et  $B$  constantes,  
 $t$  temps.

La représentation symbolique 8/20 ou 4/10 correspond à l'énoncé du temps de front et du temps de queue exprimés en  $\mu s$ , comme indiqué sur la figure 8.

**Nota** : rappelons qu'une onde 8/20 est une onde dont le temps de montée à la valeur maximale est 8  $\mu s$  et la durée jusqu'à la mi-valeur en retombée est 20  $\mu s$ .

Ces ondes ont des formes très régulières facilement reproductibles en laboratoire. Elles ne ressemblent en rien aux formes des coups de foudre réels comme on peut en juger sur la figure 7. Toutefois, par leur simplicité et leur reproductibilité, ces ondes théoriques ont permis d'obtenir de bons résultats (en particulier pour tester les parafoudres) qui ont été validés par l'expérience. Ainsi, par exemple, les chocs de foudre sur les réseaux électriques et leurs conséquences ont été pris en compte avec succès avec ce type de forme d'onde biexponentielle. Rappelons pour mémoire que l'on utilise aussi l'onde de tension 1,2/50 pour tester les isolations des matériels.

Il est par contre fondamental de se souvenir que ces ondes de laboratoire ou utilisées pour des calculs numériques ne sont que théoriques et que les coups de foudre peuvent avoir des durées bien plus longues que les ondes usuelles 4/10 ou 8/20.

De nos jours, pour certaines applications plus spécifiques (avionique...), des formes d'onde plus complexes visant à reproduire la réalité plus finement (en particulier le courant continu entre deux impulsions) sont apparues. De même, des ondes biexponentielles plus longues sont utilisées dans certains pays.

#### 1.4.2 Distribution des différents paramètres des coups de foudre

Les paramètres utilisés pour décrire l'impulsion des coups de foudre (ou les impulsions dans le cas de choc de foudre négatif multiple) sont nombreux. On peut citer en particulier : amplitude de courant, temps de front, temps de queue, charge et énergie spécifique.

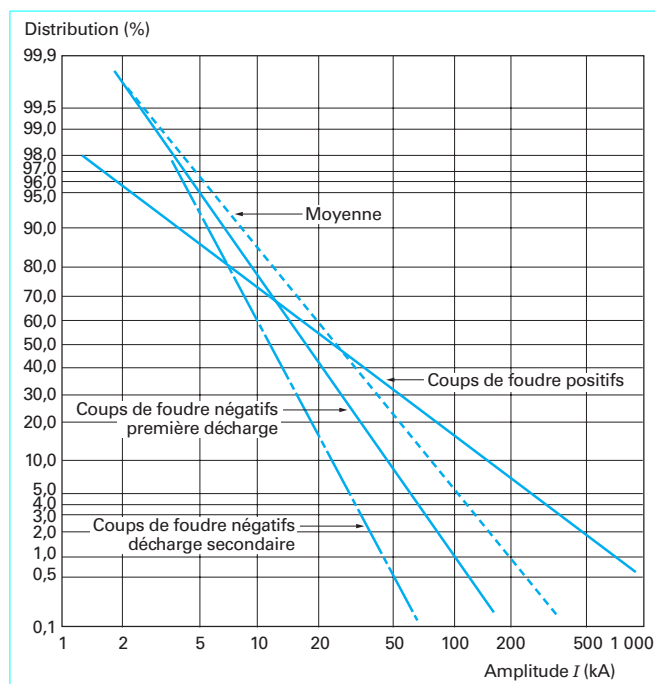


Figure 9 – Distribution statistique des amplitudes de courants de foudre

Ces paramètres font référence aux formes des chocs de foudre réels telles qu'elles ont été mesurées pour établir les statistiques de distribution. On peut en première approximation considérer que l'amplitude, le temps de queue et le temps de front sont définis

comme en laboratoire. La charge, quant à elle, correspond à  $\int i dt$

et l'énergie spécifique à  $\int i^2 dt$ . L'utilité de ces paramètres sera évoquée plus loin.

Il est toutefois important de noter que les trois premiers paramètres sont indépendants en termes statistiques. Il n'existe pas de corrélation nette entre ces trois valeurs. Pratiquement, cela veut dire que l'on peut rencontrer n'importe quelle valeur d'amplitude avec n'importe quelle valeur de temps de queue, mais aussi qu'un choc de foudre ayant une très forte valeur d'amplitude et de temps de queue est relativement rare.

La raideur du front (plus forte pente du courant exprimée en  $kA/\mu s$ ) est parfois aussi une donnée intéressante pour caractériser une impulsion bien qu'elle soit liée à d'autres paramètres déjà définis : temps de front et amplitude.

Le choc de foudre total comprenant la ou les impulsions et le courant continu circulant entre deux impulsions est essentiellement caractérisé par sa durée totale.

À titre d'exemple, la figure 9 représente la distribution globale (moyenne) des amplitudes des courants de foudre, obtenues à partir de toutes les données mondiales actuellement disponibles. On y a également représenté, séparément, les distributions des amplitudes des courants de foudre positifs et des courants de foudre négatifs (première impulsion et impulsion secondaire). La figure 10 représente les distributions des temps de queue, paramètre particulièrement utile pour les calculs d'énergie.



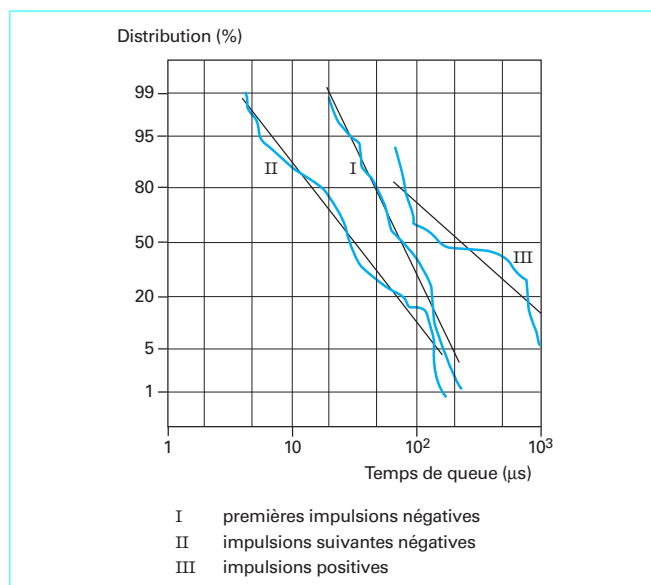


Figure 10 – Distribution des temps de queue

Ces distributions (ainsi que celles des autres paramètres) obéissent à une loi de probabilité du type log-normale ; en effet, si l'on porte en abscisse le logarithme de l'intensité (en kA) du coup de foudre et en ordonnée la probabilité qu'à un coup de foudre de dépasser une intensité donnée (en échelle gaussienne), on obtient sensiblement des droites. Les distributions des autres paramètres sont données dans la référence bibliographique [1] et dans les normes CEI.

#### 1.4.3 Effets des paramètres caractéristiques de la foudre

Les différents paramètres évoqués précédemment ne conduisent pas aux mêmes effets ni aux mêmes modes de défaillance, en général, sur les différents matériels (ces différents effets sont discutés en détail au paragraphe 3) :

- l'amplitude de courant est utile pour traiter des problèmes de surtensions et des problèmes d'efforts mécaniques engendrés par les chocs de foudre ;
- le temps de front ne sert qu'à traiter le problème des surtensions lorsqu'interviennent des inductances dans les circuits foudre ou des couplages inductifs entre circuits ;
- le temps de queue est lié aux efforts mécaniques, en ce sens qu'il sert à déterminer la durée d'application de la force électromagnétique ; il est principalement représentatif de l'énergie du coup de foudre en liaison avec l'amplitude.

Pour représenter cette énergie, le binôme (amplitude, temps de queue) peut être remplacé par :

- l'énergie spécifique (qui mixte amplitude et temps de queue) :  $\int i^2 dt$  quand on s'intéresse au dimensionnement des composants des paratonnerres (connecteurs, conducteurs...) ;
- la charge (qui mixte aussi amplitude et temps de queue) :  $\int i dt$  quand on s'intéresse aux caractéristiques des parafoudres reliés aux systèmes de protection (paratonnerre + prise de terre) ou à la fusion du métal au point d'impact de la foudre.



Figure 11 – Canal ionisé (photo G. Labrunée)

## 2. Mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique

### 2.1 Mécanisme d'impact

Nous avons déjà fait allusion au mécanisme d'impact, qui explique comment se décide le point exact qui va être frappé par la foudre. Contrairement à des idées largement répandues, la foudre ne frappe pas un objet à la manière de Zeus, qui vise sa cible et projette le feu du ciel avec précision. Bien au contraire, le traceur par bonds, issu du nuage orageux, est myope et progresse au hasard en se frayant son chemin dans l'air sur la plus grande partie de sa trajectoire. Ce n'est qu'au dernier moment, lorsqu'il est arrivé à deux ou trois cents mètres de la terre, que tout se joue. Dans ce processus, nous serons amenés à insister sur le rôle essentiel des décharges ascendantes.

Le traceur par bonds est un canal ionisé comportant un excédent de charges négatives s'il est issu de la partie négative d'un nuage, positives s'il est issu de la partie positive d'un nuage. On admet, en outre, qu'il existe une forte concentration de charges de même signe à sa pointe. Lorsque le traceur se rapproche du sol, le champ électrique dans une zone située à la verticale de cette concentration de charges s'accroît considérablement pour atteindre, à un certain stade, des valeurs de l'ordre de 100 à 300 kV/m.

À ce moment, dans le cas d'un traceur négatif, des décharges ascendantes positives se développent en direction du traceur, alors qu'elles n'existaient auparavant qu'au plus sous forme d'effluves d'effet couronne tout à fait localisées. L'une des décharges, la plus proche ou celle qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur : le canal ionisé est dès lors continu (figure 11) depuis le sol jusqu'au nuage et la décharge principale peut avoir lieu. Il arrive parfois que deux ou plusieurs décharges ascendantes rejoignent le traceur : on assiste alors à un coup de foudre ramifié ; il en est de même lorsque plusieurs ramifications du traceur descendant donnent lieu chacune à une décharge ascendante.

Le problème qui nous intéresse ici est d'analyser les conditions de développement de la décharge ascendante et, si possible, d'introduire des valeurs numériques. Il est d'abord probable que le développement d'une telle décharge sera d'autant plus aisé que la résistance de l'objet qui en est le siège sera faible : la formation de la décharge appelle, en effet, un courant de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'ampères. Il est ainsi plausible qu'une décharge

ascendante issue d'un paratonnerre, soigneusement mis à la terre, d'un pylône à haute tension soit plus intense et progresse plus vite en direction du traceur que si elle était issue d'un arbre par exemple. Cette propriété a été vérifiée par des essais en laboratoire.

En second lieu, il est évident que le champ au sol est fonction à la fois de la quantité de charges contenues dans le traceur descendant, notamment à sa pointe, et de la distance qui sépare celle-ci du sol. Ainsi, la distance du sol à partir de laquelle le champ critique est atteint dépend de la charge portée par le traceur. Par ailleurs, les modèles actuels supposent que la première décharge du coup de foudre correspond à la neutralisation des charges du traceur, de sorte qu'il existerait un rapport à peu près constant entre l'intensité de crête du coup de foudre et la quantité de ces charges. Le dépouillement des mesures montre que ce rapport est de l'ordre de 15 kA (crête)/C. On peut alors, par cet intermédiaire, établir une relation numérique entre la distance au sol de la pointe du traceur et l'intensité de crête du courant présumé de foudre, à l'instant où le champ critique au sol est atteint.

## 2.2 Modèle électrostatique

En tenant compte de ce qui précède, c'est-à-dire :

- relation entre charge du traceur et champ au sol ;
- relation entre charge du traceur et intensité de crête du courant présumé ;
- intensité du champ au sol nécessaire pour déclencher le développement de la décharge ascendante,

on a pu établir une expression analytique de la distance entre traceur et objet au sol, pour laquelle une décharge ascendante rencontre le traceur descendant. Cette distance est appelée **distance d'amorçage**.

Pourvu que la mise à la terre de cet objet soit suffisamment conductrice, cette expression analytique est :

$$D = 10 I^{2/3}$$

avec  $D$  en mètres et  $I$  en kiloampères.

Pour que ce modèle soit utilisable pratiquement, il faut le compléter par l'hypothèse suivante : on admet que l'expression précédente de la distance d'amorçage reste applicable quelle que soit la nature des objets au sol, en particulier que ces objets soient le sol plat lui-même, une pointe de paratonnerre, un fil conducteur tendu horizontalement, les parties métalliques externes ou internes du bâtiment, des arbres.

Selon ce modèle, c'est donc, en définitive, l'objet qui se trouve le premier à la distance d'amorçage  $D$  de la pointe du traceur qui constitue le point d'impact du coup de foudre.

### Remarques

Dans des travaux antérieurs, on a souvent rencontré l'expression suivante de la distance d'amorçage :

$$D = 6,7 I^{0,8}$$

Les travaux les plus récents ont conduit à préférer la formule que nous avons donnée précédemment.

Le modèle n'est pas valable pour les traceurs positifs. Dans ce cas, on suppose que la pointe du traceur, où se trouve alors une forte concentration de charges positives, serait elle-même l'origine de filaments couronne ou *streamers*, sorte de chemins ionisés qui s'en échappent. Lorsque le traceur approche du sol, il n'y a plus ici de décharges ascendantes, ou du moins celles-ci se développent très peu ; par contre, le chemin conducteur entre sol et nuage serait formé dès que l'un de ces filaments entre en contact soit avec le sol, soit avec une structure reliée au sol. Dans un modèle d'impact en traceur positif, la longueur des filaments jouerait donc un rôle semblable à celui de la *distance d'amorçage* en négatif.

Une règle à retenir est que, en pratique, dans ce modèle simple, la jonction entre traceur descendant et décharge ascendante a lieu lorsque le champ électrique au sol, dû au seul traceur descendant, atteint une valeur de l'ordre de 500 kV/m.

## 2.3 Méthode graphique de détermination de la zone de protection

### 2.3.1 Méthode de la sphère fictive

Selon le modèle électrostatique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera, le premier, à la distance d'amorçage  $D$  du traceur descendant, même si cet objet est le sol plat lui-même.

Tout se passe donc comme si la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive, de rayon  $D$ , centrée sur elle, et comme si cette sphère accompagnait rigidement la pointe au cours de la trajectoire **à priori aléatoire** du traceur. À l'approche du sol, le premier objet que touche la sphère détermine le point d'impact du coup de foudre.

D'où le **procédé** : on imagine que la sphère fictive de rayon  $D$  est roulée au sol, dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

■ Si, au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact **avec les dispositifs de protection** (tige verticale, fil horizontal, nappe de fils, cage de Faraday) sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection de ceux-ci est assurée.

■ Si, au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact **avec l'un des objets à protéger**, le dispositif de protection devra être remanié jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puisse plus se produire.

**Exemple** : prenons le cas d'une zone de protection d'une tige verticale de hauteur  $h$  au-dessus d'un sol plat.

Soit un traceur portant des charges négatives en quantité telle que le rayon de la sphère associée soit  $D_1$ . Au cours de sa trajectoire de descente, la sphère pourra atteindre le sol suivant trois possibilités (figure 12) :

- si la sphère entre en contact uniquement avec la tige verticale (cas A), c'est celle-ci qui constituera le point d'impact du coup de foudre ;
- si la sphère entre en contact avec le sol, sans toucher la pointe (cas B), le coup de foudre touchera le sol au point S ;
- enfin, si la sphère entre en contact simultanément avec la tige et avec le sol (cas C), le coup de foudre pourra toucher soit l'une soit l'autre, mais l'impact ne pourra jamais se produire dans la zone bleue de la figure 12, qui constitue la zone de protection de la tige verticale. Mais notons que cette zone est obtenue avec la sphère de rayon  $D_1$  et qu'elle est donc relative à un courant de foudre d'intensité de crête  $I_1$ .

Il est alors évident que la zone de protection assurée par une tige verticale, tel par exemple un paratonnerre du type tige de Franklin, va dépendre du rayon  $D$  de la sphère et, par conséquent, de l'intensité  $I$  du courant de foudre qui va suivre. En particulier, si  $D$  est inférieur à  $h$ , hauteur de la tige, le contact avec celle-ci peut avoir lieu bien au-dessous de la pointe, ce qui explique parfaitement les impacts à mi-hauteur des tours que l'on a pu observer par ailleurs.

### 2.3.2 Autres configurations

Une construction géométrique semblable peut naturellement être appliquée à un fil vertical ou horizontal, ou à une nappe de fils horizontaux parallèles. À partir de ces éléments de base, on peut imaginer tout un maillage métallique entourant le volume à protéger : on parle alors d'une **protection par cage maillée**. Pour analyser la protection offerte par une telle cage, on procédera théoriquement de la même manière que celle indiquée au paragraphe 2.3.1. Mais, lors de

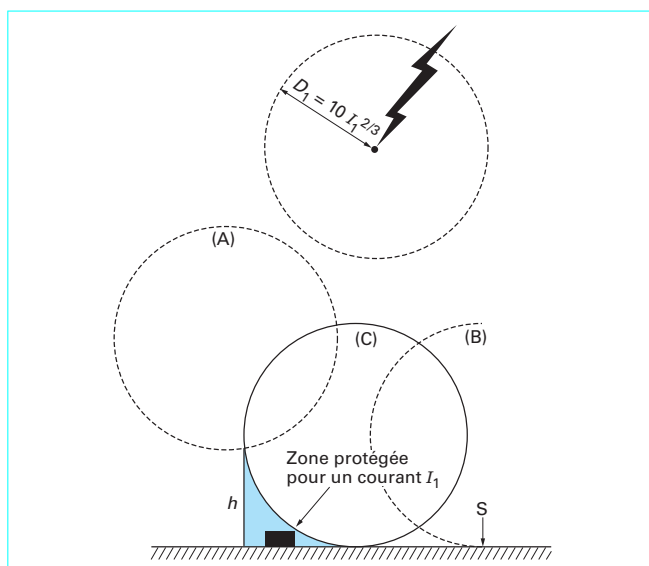


Figure 12 – Méthode de la sphère fictive

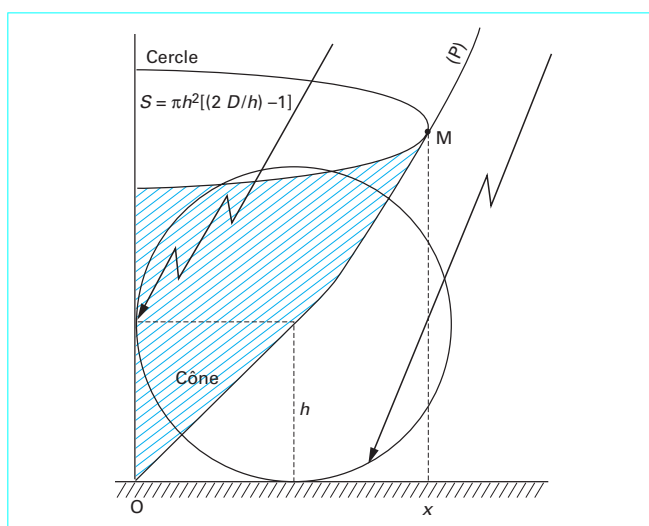


Figure 13 – Parabole et surface de capture d'une tige verticale

la mise en œuvre du procédé, il conviendra de tenir compte de certaines considérations pratiques que nous développons dans le paragraphe 4.1.

### 2.3.3 Parabole et surface de capture d'une tige verticale

Considérons l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol : le lieu des centres de ces sphères délimite la zone d'attraction de la tige. Si l'on examine la figure 13 on constate sans peine que tant que  $D < h$ , le lieu est une droite issue du pied de la tige et inclinée à  $45^\circ$ . À l'instant où  $D$  atteint la valeur  $h$ , et pour  $D > h$ , ce lieu devient une parabole (P). M étant un point de cette parabole et  $x$  sa projection à la surface du sol, la distance horizontale  $Ox$  cons-

tituera alors la distance de protection de la tige, relative à un coup de foudre d'une intensité donnée. On peut montrer aisément que  $x$  est donné par l'expression :

$$x = \sqrt{h^2 \left( \frac{2D}{h} - 1 \right)}$$

En réalité, comme représenté sur la figure 13, on obtient une surface de révolution autour de l'axe vertical portant la tige. On obtient alors le volume de capture de la tige constitué par un cône prolongé par un paraboloides de révolution. À tout point M de la parabole correspond un cercle inscrit dans le paraboloides. Ce cercle définit la surface de capture de la tige relative à une distance d'amorçage  $D$  et un courant de foudre d'intensité  $I$  donnés. Cette surface s'exprime par :

$$S = \pi h^2 \left( \frac{2D}{h} - 1 \right)$$

On voit, en particulier, que distance de protection (ou distance de capture, ce qui revient au même) et surface de capture sont fonction de la hauteur  $h$  de la tige.

Le tableau 1, établi à titre d'exemple pour une tige métallique de 30 m de hauteur, donne le rayon de protection du paratonnerre en fonction du courant de foudre présumé.

**Tableau 1 – Rayon de protection d'un paratonnerre de 30 m de hauteur (1)**

$I$ ..... (kA)	3	7	10	30	80	150
$D$ ..... (m)	19	34	44	90	174	265
$x$ ..... (m)	16	34	42	67	98	122

(1) Certaines normes donnent des tableaux avec des valeurs légèrement différentes.

Ce tableau appelle plusieurs commentaires.

On constate tout d'abord que la zone de protection est d'autant plus grande que le coup de foudre présumé sera intense. Ce comportement est, dans une certaine mesure, favorable à la propriété de protection que l'on assigne à la tige verticale. Mais, en ce qui concerne les fortes intensités, il ne faut pas se dissimuler que la réalité n'est pas aussi idéale que le modèle. Dans la réalité, il existe un grand nombre de causes de dispersion, dont les principales résultent de la notion de distance d'amorçage. Cette notion se fonde en effet sur des données scientifiques encore insuffisamment établies ; en outre la distance effective en fonction de l'intensité du courant de foudre ne saurait atteindre la précision à laquelle laisse croire une expression analytique.

Il en résulte que, lorsque le traceur doit choisir entre la pointe et le sol, la décision devient d'autant plus incertaine que le rayon à protéger et que la distance d'amorçage théorique de la décharge considérée croissent.

En ce qui concerne les coups de foudre de faible intensité, pour lesquels la distance d'amorçage est par conséquent petite, la zone de protection de la tige devient également très réduite.

Pour des intensités présumées inférieures à 7 kA, dans notre exemple, le rayon de protection de la tige devient inférieur à sa hauteur ; ce comportement apparemment paradoxal a cependant été confirmé par de nombreuses observations.

De ce qui précède, il apparaît qu'avec les dispositifs usuels de protection contre la foudre la protection absolue est illusoire. L'incertitude sur la zone protégée est liée d'une part à la probabilité très faible, mais existante, de coups de foudre très peu intenses, d'autre part au fait que les conditions d'application du modèle électro-

métrique atteignent leurs limites. Malgré ses défaillances et ses imperfections, il reste néanmoins conseillé de réaliser une protection par paratonnerre dans une région foudroyée.

### 2.3.4 Fréquence de foudroiement d'une tige ou d'un bâtiment. Calcul simplifié

Vu la longueur et la complexité des calculs que suppose l'évaluation complète du foudroiement par application du modèle électro-géométrique, et compte tenu des incertitudes de ce modèle pour les grandes distances d'amorçage, on convient de définir une surface équivalente de capture  $S$  d'une tige ou d'un bâtiment. Cette surface est, par définition, la surface de sol plat qui recevrait le même foudroiement annuel. Cette surface est toujours plus grande que la seule emprise au sol du bâtiment considéré. Cette méthode consiste à augmenter la surface au sol du bâtiment proprement dit, en entourant son périmètre par une bande, dont la largeur est égale à deux fois la hauteur du bâtiment.

#### ■ Cas de la tige verticale

La surface équivalente s'exprime alors par :

$$S = 4\pi h^2$$

On notera que si  $h$  est exprimée en mètres et si l'on suppose une densité de coups de foudre au sol  $N_S = 2$  (niveau kéraunique d'environ 20), on trouve pour expression de la fréquence du foudroiement la formule suivante, souvent citée dans la littérature :

$$N = 0,25 (h/100)^2 \text{ coups de foudre par an}$$

#### ■ Cas d'un bâtiment

Soit un bâtiment rectangulaire caractérisé par sa longueur  $a$ , sa largeur  $b$  et sa hauteur  $h$ .

La surface équivalente de capture s'exprime par :

$$S = ab + 4h(a + b) + 4\pi h^2$$

**Exemple :** pour une maison où  $a = 15$  m,  $b = 10$  m,  $h = 15$  m, on trouve :

$$S = 4\,500 \text{ m}^2$$

Probabilité de foudroiement : 0,018 ou un foudroiement tous les 55 ans avec  $N_S = 4$  coups/an/km<sup>2</sup>.

## 2.4 Recherches récentes : influence de la hauteur

Le modèle électro-géométrique simple et la méthode de la sphère fictive ne prennent pas en compte l'influence de la hauteur d'une structure sur la distance d'amorçage. Tout récemment (1996), un nouveau concept a été développé, à partir duquel il devient possible d'élaborer un modèle d'impact qui prend cette influence en compte : il s'agit du **champ de stabilisation**.

Par définition, le champ de stabilisation est le champ minimal nécessaire pour qu'une décharge ascendante puisse progresser dans l'espace de façon continue.

On verra que ce champ est une fonction de la hauteur de la structure.

Cette influence de la hauteur était certes déjà pressentie depuis longtemps, à partir de nombreuses observations, encore fallait-il préciser les critères de développement de la décharge par des travaux théoriques. Ces travaux ont été entrepris par plusieurs chercheurs,

dans le cadre d'une collaboration entre l'ONERA (A. Bondiou-Clergerie et Ph. Lalande), Électricité de France (A. Bonamy), le CNRS (R. Hadaji) et l'université de Padoue en Italie (I. Gallimberti). Ces chercheurs ont analysé en détail les divers processus physiques qui interviennent dans la formation et le développement de la décharge positive (ionisation, rôle des photons, bilan énergétique...) et viennent de déboucher sur un modèle physico-mathématique de progression de ce type de décharge.

Que savait-on avant ce nouveau modèle ? Par des recherches expérimentales au laboratoire à très haute tension d'EDF au centre des Renardières, on avait pu mesurer le champ nécessaire à l'initiation et à la progression de décharges issues de tiges verticales placées au-dessus d'un sol plan. Ainsi, pour une tige de 0,5 m de hauteur, ce champ est d'environ 250 kV/m et, pour une tige de 3,5 m de hauteur, il est de 200 kV/m ; il s'agit bien entendu du champ ambiant « non perturbé » par la tige, c'est-à-dire tel qu'il serait mesuré en absence de celle-ci. À l'autre bout de l'échelle des hauteurs, l'existence des coups de foudre ascendants spontanés indique que, pour des tours de hauteurs supérieures à cent mètres, le démarrage et la progression de la décharge se produisent pour des champs de 20 à 50 kV/m.

Entre ces deux extrêmes, il y a tout lieu de penser que le champ de progression aura des valeurs intermédiaires.

Dans les recherches récentes signalées précédemment, les auteurs ont établi la formule suivante, qui rend assez bien compte de l'intensité du champ de stabilisation en fonction de la hauteur de la structure :

$$E_{\text{stab}} \text{ (kV/m)} = [240/(1 + H/10) + 12] \delta$$

avec  $\delta$  densité relative de l'air,  
 $H$  hauteur de la structure en mètres.

D'autres chercheurs, tels F. Rizk (HydroQuébec, Canada) ou G. Berger (CNRS-Supélec) ont proposé des formules similaires.

Il faut néanmoins préciser que, pour qu'une décharge puisse s'initier à partir d'une structure, une deuxième condition est nécessaire : il faut qu'en au moins un point du sommet de la structure un effet couronne puisse se former ; sans effet couronne initial, ces diverses formules, dont celle donnée ci-dessus, ne sont plus valides.

Ces formules, associées à la fonction qui permet de calculer le champ au sol à partir de la hauteur du traceur descendant et de l'intensité de crête du courant d'arc en retour fournissent en même temps le champ d'initiation de la décharge ascendante positive et la distance à laquelle doit se trouver le traceur par bonds descendant pour générer ce champ. Cette distance a été appelée par ces auteurs **distance d'attraction**. Comment peut-on alors en déduire la distance d'amorçage définie dans le modèle électro-géométrique de base ?

Pour ce faire, on part de la position du traceur descendant lorsque le champ d'initiation est atteint. Ensuite, les deux décharges, traceur descendant et décharge (ou traceur) ascendant(e), progressent à la rencontre l'une de l'autre. Le point de rencontre dépend alors seulement de la vitesse relative de progression de ces deux traceurs. Si l'on admet l'hypothèse raisonnable que les vitesses respectives du traceur ascendant et du traceur descendant sont, en moyenne, dans un rapport de 3/4, le point de rencontre aura lieu au 3/7<sup>e</sup> de la distance d'attraction. Cette distance est aussi la longueur atteinte par le traceur ascendant, et nous l'avons précédemment définie comme la distance d'amorçage  $D_a$ .

On peut maintenant établir le réseau de courbes de la figure 14 qui donnent les distances d'amorçage en fonction des intensités de courants d'arcs en retour, pour plusieurs hauteurs de structures.

Nous y avons inséré les distances d'amorçage  $D(500)$ , obtenues par la règle des 500 kV/m du modèle de base (cf. § 2.2) : on peut constater que ces valeurs sont intermédiaires entre les distances pour  $H = 10$  m et pour  $H = 20$  m, ce qui confirme la validité du modèle simple pour les hauteurs de structures courantes. En présence simultanée de structures de hauteurs très différentes, la méthode de la sphère fictive n'est toutefois plus directement



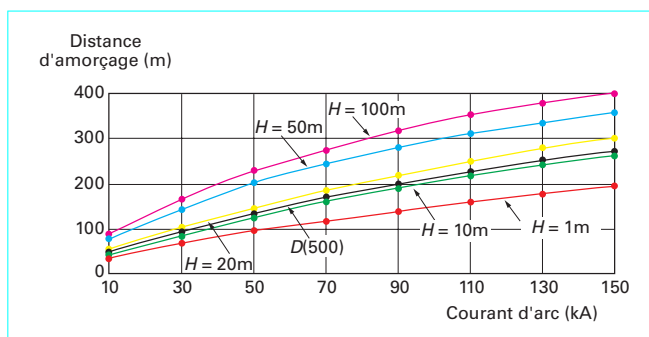


Figure 14 – Distances d'amorçage en fonction du courant d'arc en retour pour plusieurs hauteurs de structures  $H$

utilisable ; une construction géométrique un peu plus compliquée devient nécessaire.

### 3. Effets de la foudre

En tant que phénomène électrique, la foudre peut avoir les mêmes conséquences que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique ou que tout autre passage de courant à travers un mauvais conducteur ou un isolant. Par conséquent, on peut s'attendre aux effets suivants :

- effets thermiques (dégagement de chaleur) ;
- effets électrodynamiques (apparition de forces) ;
- effets électrochimiques (décomposition galvanique) ;
- effets acoustiques (tonnerre).

De ces quatre sortes d'effets, seuls les deux premiers jouent, en pratique, un rôle notable.

#### 3.1 Effets thermiques

##### 3.1.1 Effets liés à la quantité de charge $Q$

Ce sont les **effets de fusion au point d'entrée** du courant de foudre dans un conducteur électrique, désignés par le terme **traces d'impact**.

Sur les installations de protection contre la foudre, on les observe surtout sur les pointes aiguës, où l'on constate parfois une fusion de l'extrémité de la pointe, sur quelques millimètres au maximum.

Sur des surfaces planes (tôles), on constate des traces de fusion qui peuvent, pour des tôles très minces, évoluer jusqu'au percement complet.

En supposant que la chute de tension anodique à la racine de l'arc, c'est-à-dire au contact avec le métal, reste constante et égale à  $u$  pendant toute la durée du coup de foudre, l'énergie dissipée localement s'écrit :

$$W = u \int i dt = uQ$$

**Exemple** : avec  $u = 20$  V et  $Q = 30$  C, cette énergie sera de 600 J.

Un tel dégagement de chaleur peut théoriquement entraîner la fusion d'environ  $60 \text{ mm}^3$  d'acier.

Avec une trace d'impact de 25 mm de diamètre, l'effet de fusion a donc une pénétration de 0,15 à 0,25 mm, en supposant qu'aucune chaleur n'est dissipée par la masse du métal.

Sur du cuivre ou de l'aluminium, le même dégagement de chaleur entraîne une pénétration deux à trois fois plus grande (0,4 à 0,6 mm), pouvant provoquer des trous par fusion dans les feuilles minces.

Un coup de foudre exceptionnel (300 C) est, en revanche, capable de percer des tôles jusqu'à une épaisseur de 2 à 3 mm.

C'est pour cela que, lorsqu'une paroi métallique est utilisée ou peut servir de capteur de foudre, elle devra avoir, selon le type, une épaisseur minimale (par exemple, 4 mm pour du fer, 5 mm pour du cuivre).

Un phénomène qui peut être rattaché à l'effet d'écoulement d'une charge est le suivant : des décharges brèves, même si elles sont intenses, ne provoquent pas toujours la mise à feu des matières facilement inflammables qu'elles traversent. Ainsi le foin, la paille, le papier haché sont simplement dispersés par la décharge. Au contraire, ce sont les **décharges de faible intensité mais de longue durée** qui entraînent plus facilement la mise à feu. Comme, généralement, les décharges impulsionnelles de la foudre sont accompagnées d'un courant persistant (§ 1.3.2), les coups de foudre sont rarement *froids*. Même le bois sec peut être enflammé par ce genre de foudre à longs courants persistants.

Les **mauvais contacts** sont des points particulièrement dangereux sur le parcours d'un courant de foudre. Des résistances de contact de quelques millièmes d'ohm provoquent déjà des dégagements de chaleur assez grands pour que des quantités de métal appréciables puissent (par exemple aux jonctions des tuyaux de descente des eaux pluviales) être liquéfiées et gicler en étincelles. Si une matière facile à enflammer se trouve près de semblables points de mauvais contact, il peut en résulter des mises à feu indirectes. Ce genre d'étincelles giclantes est particulièrement dangereux dans les établissements exposés aux explosions et dans les fabriques d'explosifs.

Parallèlement, c'est la charge  $Q$  qui sert de base au dimensionnement des parafoudres reliés au système de protection. Dans le cas d'un éclateur (cf. article *Parafoudres* [D 4 755] dans le traité Génie électrique), il s'agit d'un amorçage entre deux électrodes et l'on traite bien alors un problème de point d'impact. Dans le cas d'une varistance (semi-conducteur dont la résistance varie avec la tension), il n'y a pas d'amorçage entre deux électrodes mais c'est aussi la charge qui est utilisée en première approximation, car la tension à ses bornes est pratiquement constante.

**Remarque** : pour une varistance, dans le cas de forts courants ( $> 10$  à  $20$  kA) ou quand on veut obtenir un dimensionnement plus précis, il est préférable de considérer le binôme  $(I, T_Q)$  plutôt que d'utiliser la charge.

##### 3.1.2 Effets liés à l'intégrale de courant $\int i^2 dt$

Quand le courant de foudre a pénétré dans un **conducteur métallique** dans lequel il peut se propager, son dégagement de chaleur obéit à la loi de Joule où interviennent le carré de l'intensité  $i$ , le temps  $t$  de passage du courant et la résistance ohmique  $R$ .

Dans la mesure où la résistance du conducteur reste constante, l'énergie dissipée s'écrit :

$$W = R \int i^2 dt$$

Des effets thermiques importants apparaissent donc surtout en des points de forte résistance.

Il ne faut cependant pas prendre pour valeur de la résistance  $R$  d'un conducteur celle que l'on mesure en courant continu. Pour les brèves ondes de choc que sont les courants de foudre apparaît, comme en haute fréquence, le phénomène de l'**effet de peau**, c'est-à-dire que le courant se trouve confiné dans une couche mince de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur à la surface du conducteur. La résistance réelle de la couche peut s'élever à plusieurs fois celle du conducteur mesurée en courant continu, qui correspond à la section totale.

Dans le cas des conducteurs de descente de paratonnerres, les bandes métalliques subissent presque la même majoration de résistance que les barres rondes de même section ; à cet égard elles sont donc équivalentes.

Dans des conducteurs de section suffisante, il n'apparaît pas de conséquences visibles de l'échauffement, malgré l'effet pelliculaire. Des échauffements allant jusqu'à la température de fusion ne se produisent que dans des sections faibles de conducteurs ou pour de fortes résistivités. On observe souvent des effets de fusion, par exemple sur des câbles d'antennes et des fils. Au contraire, on n'en observe que rarement sur des fils plus gros, de quelques millimètres de diamètre (par exemple, fils de fer barbelés). On n'a jamais constaté de cas de fusion sur des conducteurs de foudre présentant les sections recommandées dans la norme NF C 17-100 (cf. [Doc. C 3 307]).

Au contraire, dans les **mauvais conducteurs**, beaucoup d'énergie est libérée sous forme de chaleur par le passage du courant. C'est pourquoi l'eau contenue dans le bois, la maçonnerie et les matériaux analogues est échauffée et vaporisée. Du fait de la brièveté du phénomène dans son ensemble, et comme conséquence de la surpression qui en résulte, il se produit des éclatements d'allure explosive d'arbres, de mâts en bois, de poutres et de murailles. Des effets explosifs de ce genre surviennent de préférence aux endroits où s'accumule l'humidité (fentes, vaisseaux pleins de sève) ou à ceux où la densité de courant est fortement augmentée, c'est-à-dire aux points d'entrée ou de sortie du courant entre un matériau mauvais conducteur (maçonnerie) et un matériau bon conducteur (colliers de fixation d'une descente de foudre endommagée, crampons de canalisations électriques, colliers en acier de conduites de gaz et d'eau). Ces effets sont à tort attribués à des forces électrodynamiques du courant de foudre.

Dans les sols mauvais conducteurs (sable siliceux), il arrive qu'il y ait fusion-vitrification du sable au passage de la foudre (canaux de foudre ou fulgurites). Là où le courant de foudre dispose de grandes sections de bonne conductivité, il ne peut pas se produire d'échauffements dangereux ni, par conséquent, de mise à feu. Un coup de foudre dont le courant est capté et conduit au sol par un conducteur métallique ininterrompu et de section suffisante reste ainsi un coup de foudre froid.

### 3.2 Effets électrodynamiques

Des efforts mécaniques de quelque importance ne peuvent se manifester que là où des parties du chemin parcouru par la foudre sont disposées les unes par rapport aux autres de telle façon que l'une d'elles se trouve dans le champ magnétique créé par l'autre. Dans ce cas, plus l'écart entre ces parties est faible, plus les efforts deviennent grands. De petites spires cherchent à s'agrandir avec une grande force.

**Exemple** : sur un anneau de 10 cm de diamètre en fil rond de 8 mm, et dans le cas d'un très fort courant de foudre de 100 kA, il est appliqué à chaque centimètre du périmètre une force de 1 200 N ; si le diamètre était de 2 m, la force ne serait plus que de 140 N.

Par le fait de l'interaction réciproque entre le courant de foudre dans un conducteur et le champ magnétique terrestre, il ne peut se

développer que des effets mécaniques de l'ordre de 10 N au plus par mètre de conducteur ; ces effets sont anodins.

À côté de ces forces de répulsion qui, dans des cas rares, peuvent causer des déformations de conducteurs, il y a aussi de puissants efforts d'attraction entre des voies parallèles offertes au courant de foudre, lorsque leur écartement est assez faible. C'est ainsi que des antennes tubulaires minces s'écrasent et que des conducteurs parallèles s'entrechoquent. Si le courant de foudre parcourt des conducteurs électriques isolés très rapprochés, l'isolant qui les sépare est aplati. Pendant un très violent coup de foudre (100 kA), ces forces atteignent  $10^5$  N par mètre de conducteur pour un écartement de 5 mm, et  $10^3$  N par mètre pour 50 cm d'écartement. Pour des écartements plus grands, les efforts devraient presque toujours être sans conséquence.

## 4. Conception générale d'une installation de protection

On distingue aujourd'hui deux systèmes de protection, qui sont complémentaires l'un à l'autre.

■ **Les systèmes de protection extérieure** ont pour fonction de capter les coups de foudre qui, en leur absence, auraient frappé le bâtiment ou la structure, puis d'écouler les courants de foudre vers la terre, sans que ceux-ci puissent causer des dégâts ou pénétrer à l'intérieur du volume à protéger.

■ **Les systèmes de protection intérieure** ont pour fonction de protéger les installations et équipements électriques intérieurs, ainsi que les personnes, contre les surtensions conduites ou induites et les montées en potentiel (nous verrons par la suite ce qu'il faut entendre par ces termes).

Aujourd'hui, les équipements électriques, mais surtout les télécommunications, l'informatique, l'audiovisuel envahissent tous les domaines de l'activité humaine, l'industrie, l'artisanat, le tertiaire, la domotique. Du fait de la très grande vulnérabilité de ces matériels aux surtensions de foudre, la tendance est de porter une attention privilégiée à la protection intérieure.

## 5. Installation de protection extérieure

### 5.1 Composants

Une installation de protection comporte divers éléments reliés électriquement entre eux :

- un ou plusieurs dispositifs de capture des décharges atmosphériques ;
- des conducteurs de toiture ;
- des conducteurs de descente ;
- des prises de terre (cf. § 5.6).

Les dispositifs de capture sont des tiges verticales terminées par une pointe. On parle de **pointes caprices** lorsque leur longueur est inférieure à 1 m (les pointes caprices sont associées aux cages maillées) et de **tiges de Franklin** lorsque leur longueur est supérieure.

Les **conducteurs de toiture** et les **conducteurs de descente** ont pour rôle principal d'écouler vers la prise de terre les courants de

foudre captés par les dispositifs de capture mais, conformément au modèle électrostatique, ils peuvent eux-mêmes, le cas échéant, être touchés par la foudre.

Il résulte de cette observation qu'il existe fondamentalement deux systèmes de protection contre la foudre (SPF en français et LPS en anglais) qui ne diffèrent que par les dispositifs de capture, le nombre de conducteurs de toiture et de descente, et la fonction principale que l'on attribue à chacun de ces éléments. Ce sont :

- les SPF à tiges ;
- les SPF à cage maillée.

En pratique, les systèmes comportant des paratonnerres à tiges jouent également le rôle de cage, en raison de la présence des conducteurs de toiture et de descente, qui contribuent à la protection du volume qu'ils entourent.

Inversement, les systèmes à cage maillée sont équipés de petites pointes caprices, dont l'effet attractif sur la foudre est un peu plus marqué que celui des conducteurs constituant la cage, bien que la fonction de capture soit également dévolue à ces derniers et que, dans certains pays, les cages maillées n'aient pas de pointes caprices.

Par ailleurs, le système à cage répartit l'écoulement des courants de foudre entre les diverses descentes, et cela d'autant mieux que les mailles sont plus serrées.

Les SPF ayant le plus grand nombre de conducteurs de toiture et de descente sont donc recommandés lorsque des phénomènes d'induction sont particulièrement à craindre (par exemple, présence dans un bâtiment de dispositifs électroniques, d'ordinateurs). Une autre solution consiste à placer un paratonnerre ayant une distance de protection suffisante sur un mât, à proximité du bâtiment, afin de limiter l'influence des perturbations électromagnétiques.

## 5.2 Nombre et disposition des conducteurs de toiture et de descente

Rappelons que le modèle électrostatique suppose une distance d'amorçage identique, quels que soient les objets considérés. En réalité, la physique du phénomène de développement de la décharge de capture (ou décharge ascendante) laisse très fortement suggérer que cette décharge se développera difficilement à partir d'un objet peu conducteur tel, par exemple, un mur de briques ou de pierres. On admet alors que l'objet est encore correctement protégé, même s'il débord la structure métallique de protection, si les conditions suivantes sont respectées :

- la distance  $\ell$  entre deux éléments capteurs, **comptée le long du contour à protéger**, n'excède pas  $D\sqrt{2}$  ( $D$  étant la distance d'amorçage) ;
- en tout point d'approche du bâtiment, **au moins un élément est en vision directe**.

Par élément, nous entendons un conducteur de toiture ou de descente, ou la maille d'une cage.

Un autre facteur favorable est l'**effet d'écran** des structures de protection (paratonnerres avec leurs descentes, nappes horizontales, cages), surtout si elles entourent un volume. Cet effet est susceptible de réduire, dans certains cas, le champ électrique à l'intérieur du volume protégé et, par conséquent, contribue à freiner le développement des décharges qui pourraient se former sur les structures protégées.

## 5.3 Problème du choix de la distance d'amorçage

La théorie électrostatique aussi bien que la méthode de la sphère fictive montrent clairement que les zones de protection dépendent étroitement du choix de la distance d'amorçage  $D$ . Si l'étude de la protection a été faite avec une distance  $D_c$  que nous désignerons par **distance d'amorçage critique**, il est aisé de voir que la protection sera bonne vis-à-vis des courants tels que  $D > D_c$  mais, par contre, ne sera plus entièrement efficace pour les courants où  $D < D_c$ . Cela correspond au phénomène, déjà maintes fois évoqué, de non-protection vis-à-vis des coups de foudre de faible courant.

Par ailleurs, il apparaît clairement que, plus la protection souhaitée doit être complète, plus serrée devra être le réseau de pointes verticales, de descentes et de fils horizontaux. Il y a donc un optimum à rechercher, qui dépend du coût de l'installation de protection et du taux de sécurité que l'on s'imposera.

Si une **protection renforcée** est nécessaire, la distance d'amorçage critique  $D_c$  devra correspondre au plus faible courant de foudre pratiquement envisageable, c'est-à-dire 2 kA. Dans ce cas, on aura  $D_c = 15$  m.

Si un certain risque de foudroiement de l'objet à protéger peut être accepté, voici comment l'on peut calculer le taux de défaillance. Supposons que nous nous limitons à la protection des courants  $I \geq 5$  kA. Sur la figure 9, on voit que la protection restera garantie à 95 %, c'est-à-dire que dans 5 % seulement de l'ensemble du foudroiement prévisible, une défaillance de la protection pourra se produire.

**Exemple :** reprenons le cas du calcul de la fréquence de foudroiement d'une maison, présenté au paragraphe 2.3.4. Nous voyons que la probabilité de foudroiement non protégé tombe à  $0,018 \times 0,05$ , soit un risque de défaillance tous les 1 000 ans environ. Cette probabilité sera obtenue avec  $D_c = 10 \times 5^{2/3} = 29$  m (cf. § 2.2).

Grâce à cette méthode de calcul du risque, il est possible d'établir une hiérarchie de la sécurité d'un ensemble. Cette méthode permet de réaliser un calcul de risque basé implicitement sur le coût d'une protection la plus efficace possible et d'un coût compatible avec les personnes et les biens à protéger. Un calcul du risque plus détaillé, prenant en compte explicitement le facteur coût ainsi que d'autres facteurs comme la structure du bâtiment est présenté au paragraphe 5.7.

## 5.4 Nombre et disposition des dispositifs de capture

La normalisation internationale a pris en compte la notion de risque. Elle a, pour ce faire, introduit plusieurs niveaux de protection, en fait quatre niveaux. La norme française UTE C 17-100, transcription de la prénorme européenne ENV 61024-1 (cf. [Doc. C 3 307]), l'a adaptée en introduisant les niveaux 1, 2, 3, 4. Pour chaque niveau (cf. tableau 2), elle préconise un rayon de sphère, un angle de protection des tiges de Franklin et une largeur de maille pour la protection par cage maillée.

Il convient ici de donner une précision en ce qui concerne le volume protégé par les tiges. Par le passé, on a longtemps admis que ce volume était défini par un cône dont le sommet coïncide avec la pointe de la tige, mais il existait une grande divergence quant à la valeur du demi-angle de ce cône : ces valeurs variaient entre  $30^\circ$  et  $60^\circ$ , selon les auteurs. D'autre part, le modèle de la sphère fictive indique que ce volume est limité par un arc de cercle tournant autour de la tige. Afin de conserver les anciennes habitudes, il a été convenu de donner une équivalence entre l'angle du cône et l'arc de cercle, cette équivalence étant simplement l'égalité des volumes protégés.

Ces diverses considérations ont conduit la norme française à établir le tableau 2, dans lequel nous avons ajouté, pour information, le risque de défaillance relatif à chaque niveau de protection.

**Tableau 2 – Paramètres des dispositifs de capture en fonction du niveau de protection (1)**

NP	RdD (%)	R (m)	Angle $\alpha$ (°) approximé pour $h$ (m) donné					LdM (m)
			10	20	30	40	50	
4	20	60	65	55	45	35	30	20
3	10	45	60	45	35	25		15
2	5	30	55	35	25			10
1	2	20	45	25				5

(1) NP : niveau de protection ;  
RdD : risque de défaillance de la capture ;  
R : rayon de la sphère fictive ;  
h : hauteur de la pointe de Franklin au-dessus du plan à protéger ;  
LdM : largeur de la maille d'un système maillé.  
Les angles indiqués sont approximés à partir des courbes données dans la norme.

Ce tableau fait effectivement apparaître des angles de protection de valeurs différentes, selon les cas considérés, mais ces valeurs sont maintenant étayées par une certaine logique ; on voit de plus que les angles ne sont pas définis (zone tramée bleue) dès que la hauteur  $h$  de la pointe est supérieure au rayon  $R$  de la sphère fictive, car cette condition entraîne un risque d'impact latéral.

## 5.5 Conducteurs de toiture et de descente

Nous avons montré que, si l'on ne prenait en considération que l'échauffement dû à l'écoulement des courants de foudre, on pourrait se contenter de n'utiliser que des conducteurs de faible section. Mais, dans la pratique, il faut prendre en compte d'autres contraintes, telles que les risques de dégradations mécaniques ou par corrosion, ainsi que les efforts électrodynamiques. De plus, les conducteurs de toiture et de descente ne doivent pas être endommagés par les impacts directs de la foudre. Pour ces diverses raisons, on utilise des conducteurs de section ronde d'au moins 8 mm de diamètre, ou du ruban plat d'au moins 30 x 2 mm. Ils sont habituellement en cuivre ou en acier (galvanisé ou inoxydable), moins souvent en aluminium.

## 5.6 Prise de terre

Cet élément d'un système de protection a pour fonction principale de diffuser les courants de foudre dans le sol. Du temps de Franklin, et même jusqu'au début du vingtième siècle, on pouvait se contenter d'une simple chaîne métallique plongeant dans un puits. Mais, dans les installations de protection modernes, la prise de terre joue également un rôle essentiel pour la protection des personnes et des équipements électriques intérieurs, rôle que nous expliciterons au paragraphe 6. Disons dès maintenant que, pour assurer cette seconde fonction, une prise de terre doit répondre à des spécifications précises et doit être réalisée avec le plus grand soin.

Une prise de terre moderne est constituée d'un ensemble de conducteurs enterrés, généralement horizontalement, à une profondeur

de l'ordre de 80 cm, souvent complétés par des piquets enfoncés verticalement. La longueur totale de conducteur que l'on enterre dépend essentiellement de la nature des sols, qui détermine leur résistivité, et de l'épaisseur des diverses couches de sol (sols argileux, marneux, sableux, granitiques, couche d'humus au-dessus d'un sol rocheux, etc.). Lorsque le sol est de bonne conductivité, la prise de terre peut souvent n'être qu'une « patte d'oie », c'est-à-dire trois brins enterrés horizontalement en étoile, de trois à cinq mètres de longueur chacun, et raccordés à une descente de paratonnerre. Si la couche profonde est meilleure conductrice que la couche superficielle (par exemple parce qu'elle est humide), cette patte d'oie sera complétée par des piquets verticaux. Mais la meilleure prise de terre, recommandée lorsqu'il y a nécessité d'une protection intérieure, est la ceinture enterrée, qui entoure entièrement le bâtiment ou, mieux encore, la ceinture en fond de fouille, cette solution n'étant possible que si on la réalise au moment de la construction du bâtiment. Les conducteurs enterrés sont de même section et de même nature que ceux qu'on utilise pour les descentes ; mais l'aluminium doit être proscrit, à cause du risque de corrosion.

## 5.7 Calcul du risque encouru par les bâtiments

Il existe actuellement à l'état de projet dans les normes [CEI, NFPA (*National Fire Protection Association*), BSI...] un calcul du risque encouru par les bâtiments devant conduire à l'installation d'une protection contre la foudre ou non et aussi au choix de l'efficacité de la protection dans le cas où elle est nécessaire. Comme ces guides diffèrent quelque peu et qu'ils ne sont, en général, seulement publiés que sous forme de projets, il a paru utile de donner quelques indications sur le calcul du risque encouru par les bâtiments. En effet, les constructeurs et les projets de normes utilisent en général cette approche et il paraît utile d'en expliquer les principes.

Dans certains cas, les **facteurs personnels ou économiques** peuvent être très importants et doivent être pris en compte indépendamment du résultat du calcul du risque encouru. Par ailleurs, les bâtiments avec un risque inhérent, par exemple les fabriques d'explosifs, les supermarchés... nécessitent généralement la meilleure protection possible. Pour tous les autres bâtiments, le calcul du risque encouru conduit à déterminer l'efficacité de la protection nécessaire.

**Nota** : cette efficacité se traduit en termes de niveau de protection. Les niveaux varient de 4 à 1 en général et correspondent à des distances d'amorçage décroissantes, et donc à des efficacités croissantes. En effet, plus la distance d'amorçage sera petite, plus on prendra en compte, lors de la conception du système de protection, les coups de foudre d'intensité les plus faibles. Or ce sont les coups de foudre les plus faibles qui sont les plus susceptibles de frapper le bâtiment malgré la présence du système de protection. On définit bien ainsi l'efficacité du système de protection.

À la question de savoir si la protection est nécessaire ou pas, la réponse peut être, dans de nombreux cas, évidente.

On peut citer, par exemple :

- un endroit où beaucoup de personnes se réunissent ;
- un endroit où des équipements ou des documents particulièrement précieux sont situés (télécommunications, ordinateurs, monuments historiques...) ;
- un endroit où le risque foudre est déjà bien connu ;
- un endroit où il existe des bâtiments très grands et isolés...

Cependant, il y a beaucoup de cas pour lesquels il n'est pas si facile de prendre une décision. Dans ces cas, les facteurs divers affectant le risque d'être frappé par la foudre et ses conséquences doivent être déterminés. On doit tenir compte tout d'abord du **risque d'exposition** exprimé en nombre de coups par an sur le bâtiment (risque lié en particulier à la localisation du bâtiment dans son environnement et à sa hauteur), puis des **facteurs correctifs suivants** :

- nature de la construction du bâtiment :  $C_1$  ;
- valeur de son contenu :  $C_2$  ;



- présence humaine dans les lieux :  $C_3$  ;
- environnement et conséquences externes d'un dommage sur le bâtiment :  $C_4$ .

Les valeurs numériques des coefficients  $C_1$  à  $C_4$  sont détaillées dans la norme UTE NFC 17-102 (p. 36 à 38, cf. [Doc. C 3 307]).

Par exemple, le risque d'exposition est lié à la zone d'attraction du bâtiment (cf. § 2.3.4) au nombre de coups de foudre par an et par  $\text{km}^2$  obtenu à partir de données locales (réseaux modernes de détection d'impact de foudre) ou tiré du niveau kéraunique de la région. Ce risque doit, par ailleurs, être majoré ou minoré (facteur  $C$ ) si le bâtiment est isolé sur une colline ou s'il est situé au milieu de bâtiments de même hauteur. On a :

$$P = N_S SC$$

avec  $P$  probabilité,  
 $S$  surface d'attraction.

Le premier facteur correctif  $C_1$  correspond à la nature de la construction du bâtiment (toiture et bâtiment). Celle-ci influe sur sa capacité à être protégé ou, au contraire, à attirer la foudre. Un bâtiment en bois est moins favorable qu'un bâtiment en métal pour l'écoulement du courant, et un toit en bois attire moins la foudre qu'un toit métallique.

Le deuxième facteur  $C_2$  tient compte de la valeur du contenu du bâtiment et du risque encouru quand la foudre a frappé. On ne protégera pas de la même façon un bâtiment contenant des matériaux combustibles et un bâtiment contenant des équipements standards.

Le troisième facteur correctif  $C_3$  est fonction de la présence humaine dans les lieux : occupation occasionnelle ou très fréquente.

Enfin, le quatrième facteur  $C_4$  est lié à l'environnement et aux conséquences externes d'un dommage sur le bâtiment en termes de continuité de service ou même de risque d'explosion.

Une fois corrigé par ces quatre facteurs, le risque d'exposition

$$R = PC_1 C_2 C_3 C_4$$

peut être comparé avec une valeur théorique qui correspond au seuil  $R_0$  d'exigence de la mise en place de la protection (cette valeur  $R_0$  est choisie par les comités normatifs nationaux et est prise égale à  $5 \times 10^{-4}$  en France). Si la réponse est positive, le risque d'exposition donne alors l'efficacité de la protection nécessaire.

Le tableau 3 donne ainsi, par exemple, des valeurs types de probabilités, la décision en découlant et la distance de protection associée au niveau demandé.

**Tableau 3 – Valeurs types des risques d'exposition  $R$**

$R$	Décision	$D$ (m)
$R < 5 \times 10^{-4}$	Protection non nécessaire	
$5 \times 10^{-4} < R < 5 \times 10^{-3}$	Protection de niveau 4	60
$5 \times 10^{-3} < R < 5 \times 10^{-2}$	Protection de niveau 3	45
$R > 5 \times 10^{-2}$	Protection de niveau 1	20

## 6. Installation de protection intérieure

L'abondance déconcertante de traces d'étincelles que l'on relève après un violent coup de foudre, même parfois dans des bâtiments pourvus de paratonnerres, les dégâts sur les équipements électri-

ques et électroniques, peuvent s'expliquer par deux effets bien connus en électrotechnique : la montée en potentiel des prises de terre, qui dépend principalement de l'intensité de crête  $I$  (amplitude) du courant écoulé, et les phénomènes d'induction, qui dépendent principalement de la pente  $di/dt$  (raideur du front) de ce courant.

Ces phénomènes produisent ce qu'il est convenu de désigner par **surtensions atmosphériques** ou **surtensions de foudre**.

## 6.1 Différences de potentiel et amorçages

### 6.1.1 Surtension transmise

La première cause, et la plus fréquente, de surtension est la chute de la foudre sur ou près d'une ligne aérienne ; le courant de foudre génère localement une impulsion de tension dans les conducteurs de cette ligne, impulsion qui va ensuite se propager jusqu'à l'habitation. Plus l'impact a été proche, plus élevée sera l'amplitude de cette impulsion au point d'entrée de la ligne dans l'habitation. Les amplitudes de ces surtensions sont généralement de l'ordre de plusieurs milliers de volts pour les lignes à basse tension (220/380 V) et pour les lignes téléphoniques ; elles sont largement suffisantes pour provoquer des étincelles et des claquages dans l'isolement des appareils électriques et, par conséquent, des dommages aux appareils électroniques.

### 6.1.2 Induction électromagnétique

Les courants de foudre d'impacts proches et, plus encore, les courants s'écoulant par les descentes de paratonnerre lors d'un coup direct génèrent, à l'intérieur des bâtiments, des champs d'induction magnétique intenses.

On sait que, dans tout circuit embrassant un flux d'induction magnétique  $\Phi$ , apparaît une force contre-électromotrice (ou tension induite)  $E$  qui s'exprime par :

$$E = - d\Phi/dt$$

Lorsque le flux est engendré par un courant  $i$ , nous écrivons :

$$\Phi = Mi$$

avec  $M$  inductance mutuelle qui, en l'absence de métal magnétique, ne dépend que de la géométrie des circuits en présence. Elle s'exprime en henrys (H).

On aura donc :

$$E = - M di/dt$$

Les vitesses de variation de courant de foudre peuvent atteindre des valeurs très importantes : 50 kA/ $\mu$ s en moyenne, le double dans des cas exceptionnels. Dans ces conditions, même de faibles inductances mutuelles peuvent entraîner des tensions induites élevées.

### 6.1.3 Montée en potentiel de la prise de terre

C'est le type de surtension le plus dangereux. Il se produit lorsque le courant de foudre d'un impact direct sur un paratonnerre s'écoule par la prise de terre de l'installation. Le mécanisme en est le suivant : une prise de terre se caractérise nécessairement par une certaine résistance électrique, que l'on peut mesurer entre les conducteurs de mise à la terre d'une part, et la « terre lointaine » d'autre part. Au moment de l'écoulement du courant, il se produit donc une « montée en potentiel » des conducteurs de terre par rapport à cette

terre lointaine, qui, elle, conserve par définition un potentiel nul. Cette montée en potentiel peut atteindre des valeurs considérables.

**Exemple** : soit une prise de terre dont la résistance est de  $20\ \Omega$ , et supposons que le courant de foudre de l'impact direct ait une amplitude de  $50\ 000\ \text{A}$  (donc bien au-dessous des amplitudes les plus élevées). La montée en potentiel des conducteurs de terre prendra la valeur

$$50\ 000 \times 20 = 10^6\ \text{V} = 1\ \text{MV}$$

### 6.1.4 Rapprochement entre descente de terre et structures métalliques d'un bâtiment

Une descente de paratonnerre forme des boucles ouvertes avec des diverses structures métalliques d'un bâtiment (canalisations d'eau, chauffage central, alimentation électrique, etc.). Ces boucles seront le siège de phénomènes d'induction et il apparaîtra entre leurs extrémités ouvertes des forces électromotrices.

Pour pouvoir déterminer la distance minimale de rapprochement, au-dessous de laquelle le claquage diélectrique est à craindre, deux cas sont à considérer.

Dans le premier cas, les diverses structures métalliques sont connectées à la prise de terre, à la base de la descente de paratonnerre, et participent entièrement à la montée en potentiel de la prise de terre : il n'y a donc pas de différence de potentiel  $\Delta U$  entre la descente de terre et les structures métalliques du bâtiment, et la seule tension existant aux bornes du rapprochement est la tension induite  $E$ . Comme celle-ci est extrêmement brève (elle dure le temps de montée du courant où  $di/dt$  est maximal, c'est-à-dire de l'ordre d'une microseconde), on peut estimer la rigidité diélectrique de l'air à environ  $1\ 500\ \text{kV/m}$ .

Dans le second cas, les terres de la descente et des autres structures sont séparées. La tension totale  $U_t$  apparaissant aux bornes du rapprochement vaut alors :

$$U_t = \Delta U + E$$

Or  $\Delta U$  dure beaucoup plus longtemps que  $E$  (puisque proportionnelle à  $i$  et donc liée à la durée totale de passage du courant) ; la tenue diélectrique est alors considérablement réduite et il faut prendre en compte une rigidité diélectrique de l'air de  $400\ \text{kV/m}$  seulement.

Une formule commode donnant la distance minimale de rapprochement dans ces conditions, en admettant que  $\Delta U = U$  et en se fondant sur un courant de crête de  $100\ \text{kA}$ , est alors la suivante :

$$e = \frac{R}{4} + \frac{\ell}{20} \text{ en mètres}$$

avec  $R$  résistance de la prise de terre ( $\Omega$ ),  
 $\ell$  longueur du contour de la boucle (m).

## 6.2 Dispositifs de protection

### 6.2.1 Prise de terre

Les premières mesures à prendre concernent le système des terres. On s'efforcera tout d'abord de réaliser une prise de terre « foudre » la meilleure possible ; compte tenu de son coût et de la nature des sols, on recommande souvent de ne pas dépasser une valeur de  $10\ \Omega$ . Mais, dans les sols mauvais conducteurs, comme des sols sableux ou rocheux, cette valeur est difficile à respecter, et la norme française accepte alors  $30\ \Omega$ .

### 6.2.2 Équipotentialisation

Même avec une bonne prise de terre, il est clair que les problèmes posés par le couplage résistif entre les divers éléments mis à la terre séparément demeurent. Pour s'en affranchir, la méthode recommandée actuellement par la normalisation internationale consiste à relier électriquement entre elles toutes les masses métalliques du bâtiment, à savoir les diverses conduites et canalisations, les rails de guidage d'ascenseurs, les installations sanitaires, les réservoirs, ainsi que les « terres » de tous les appareils électroménagers, et de connecter tout cet ensemble à la prise de terre « foudre ». On appelle cela l'**équipotentialisation** de l'installation, parce que, grâce à cette interconnexion, il ne peut plus apparaître de différences de potentiel entre ces éléments. Le terme  $\Delta U$  explicité au paragraphe 6.1.4 disparaît. En pratique, outre l'interconnexion des masses, les terres de tous les appareils électriques sont ramenées par les conducteurs de terre prévus par les constructeurs (conducteur à isolation vert et jaune incorporé dans le cordon d'alimentation) à une barrette de cuivre placée près du tableau électrique d'entrée ; cette barrette est elle-même raccordée à la prise de terre générale, constituée par la prise de terre « foudre » et par les conduites enterrées. On notera que ces conduites, pourvu qu'elles soient métalliques, participent à l'écoulement des courants de foudre en cas de coup direct sur le bâtiment et qu'elles font partie intégrante de la mise à la terre. Cette technique d'interconnexion, rendue obligatoire par les normes modernes, va exactement à l'encontre des recommandations anciennes, qui préconisaient des prises de terre séparées : prise de terre « foudre », prise de terre « sécurité », prise de terre « électronique », et cela simplement parce que le couplage entre prises de terre rend leur séparation illusoire.

#### ■ Cas particulier des très longs rapprochements. Tours de plus de 20 m de hauteur

Lorsque la tour ou l'immeuble ont une infrastructure métallique, celle-ci joue le rôle de descente de paratonnerre. Les courants de foudre sont suffisamment dilués dans les diverses pièces de la structure pour considérablement réduire l'induction à l'intérieur du volume ; le problème des distances minimales de rapprochement peut alors être simplement ignoré, dans la mesure où les précautions indiquées ci-après sont satisfaites.

Lorsque la tour est en pierre, en brique ou en béton non armé (clochers d'église, phares maritimes) et qu'elle est munie de descentes de paratonnerre, les calculs d'induction présentés au paragraphe 6.1.2 ne peuvent plus être appliqués. Pour les grandes hauteurs, où le temps de propagation des ondes de courant le long des descentes ne peut plus être négligé, il faut faire intervenir la notion d'**impédance d'onde** et la **théorie du couplage entre lignes**.

**Exemple** : considérons un clocher dont le conducteur de descente a une impédance d'onde de  $200\ \Omega$ . Le mécanisme des cloches se trouve à  $75\ \text{m}$  de hauteur. Supposons que le clocher soit frappé par une onde de foudre de  $20\ 000\ \text{A}$ , de  $1\ \mu\text{s}$  de durée de front (conditions relativement sévères, sans être exceptionnelles).

L'onde incidente mettra  $0,5\ \mu\text{s}$  à descendre au sol et à remonter jusqu'à la cage des cloches ( $2 \times 75\ \text{m}$ ).

À ce moment, juste avant que ne se manifeste l'effet réducteur de l'onde de retour, le potentiel absolu de la descente, au niveau des cloches sera de :  $0,5 \times 200 \times 20\ 000 = 2\ 000\ 000\ \text{V}$ .

Si la cage et les canalisations métalliques qui y aboutissent ne sont pas reliées à la descente, il apparaîtra entre les deux une différence de potentiel qui dépendra du **couplage** entre les lignes (on assimile ici la descente de paratonnerre d'une part, les canalisations d'autre part, à des **lignes parallèles**). Cette différence de potentiel, bien qu'étant une fraction modérée du potentiel absolu – disons  $20\ \%$  – correspondra néanmoins encore à des tensions de centaines de milliers de volts.

Si la cage et les canalisations métalliques sont connectées localement à la descente, la différence de potentiel sera localement nulle. Il en sera de même à tous les niveaux si descente et canalisations sont également interconnectées à la base. Les canalisations en question travailleront en parallèle avec la descente et contribueront à diminuer l'impédance d'onde en dérivant une partie du courant de foudre.

Il subsistera, en revanche, une différence de potentiel importante entre la cage et les canalisations qui ne lui seront pas directement reliées, notamment les alimentations électriques et les circuits de télécommande des cloches.

Deux remèdes s'offrent alors pour éviter des claquages locaux, dont le risque est qu'ils peuvent se produire dans des parties nobles de l'installation : moteur d'entraînement des cloches, relais, etc.

Le premier remède consiste à installer des parafoudres entre chaque câble ou fil et la cage, canalisant ainsi le claquage en des points bien précis (cf. § 6.2.3).

Le second remède consiste à faire passer toute la filerie par un tube métallique et à connecter ce tube à la cage, en son sommet, ainsi qu'à l'interconnexion générale des pièces métalliques à la base du clocher. On peut démontrer que les tensions induites locales sont alors complètement annulées.

Avec de telles dispositions, le clocher (ou la tour) se comportera, en cas de chute de foudre, comme une tige métallique quasi homogène. Il pourra y avoir à un instant donné, par suite des vitesses finies de propagation, des différences de potentiel élevées entre le haut et le bas mais, à un niveau donné, tous les éléments seront à peu près équipotentiels et le danger y sera donc nul.

## 6.2.3 Parafoudres

Une fonction essentielle de la protection intérieure est comme nous l'avons vu, la protection des appareils électriques, électroniques, et de télécommunication contre les surtensions apparaissant entre l'arrivée des lignes extérieures d'alimentation ou de transmissions des signaux d'une part, et le système équipotentiel des terres d'autre part. Ces surtensions pénètrent vers l'intérieur par propagation le long des lignes, par rayonnement électromagnétique, mais peuvent aussi être générées par les montées en potentiel locales. Dans ce dernier cas, on dira qu'il se produit une « surtension en retour ». Comme il est impossible de connecter les lignes directement au réseau équipotentiel, sous peine de court-circuit, on les connecte par l'intermédiaire de dispositifs de limitation de surtensions, dont le nom générique est « **parafoudres** ». Notons que ceux qui protègent le téléphone assurent en même temps la sécurité des personnes lorsqu'elles téléphonent par temps d'orage, à condition que l'équipotentialisation intérieure soit bien réalisée.

Il existe aujourd'hui sur le marché plusieurs types de parafoudres. La sélection de ceux-ci ainsi que le détail de leur constitution et de leur mise en œuvre est donné dans l'article [D 4 840] du traité Génie électrique des Techniques de l'Ingénieur.

La constitution des parafoudres est un élément important de leur sélection. Les éléments actifs des parafoudres sont les éclateurs (à gaz ou à air), les varistances à oxyde de zinc (ZnO) et les composants solides à base de silicium (diodes Zener ou autres). Les parafoudres peuvent être constitués de plusieurs composants différents.

Les parafoudres installés sur les réseaux d'énergie, à l'entrée de l'installation, pour réaliser l'équipotentialité avec le paratonnerre, sont souvent constitués d'un seul élément (varistances le plus souvent ou parfois éclateurs à air réputés autoextinguibles).

En ce qui concerne les réseaux de données ou de télécommunication, il s'agit le plus souvent d'un simple éclateur à gaz (protection des câbles coaxiaux, par exemple) ou d'un ensemble éclateur à gaz-varistance-diode Zener, quand un niveau de protection bas est recherché (lignes téléphoniques à haut débit).

### 6.2.3.1 Éclateurs à gaz ou à air

Les éclateurs sont les plus anciens composants mais toujours utilisés.

L'**éclateur à gaz** est constitué d'une enveloppe isolante (en verre ou en céramique) dans laquelle sont disposées deux ou trois électrodes en regard dans un mélange gazeux convenable sous pression. Un arc électrique jaillit entre ces électrodes dès que la surtension dépasse une certaine valeur. La tension d'amorçage de l'arc est comprise entre quelques centaines de volts et un kilovolt environ.

L'**éclateur à air**, utilisé sur les réseaux d'énergie, est encore plus simple car il n'y a pas cette enveloppe contenant un gaz sous pression. Les électrodes sont alors plus éloignées pour éviter les amorçages intempestifs dus, notamment, aux conditions climatiques. Leur tension d'amorçage est alors comprise entre 3 et 4 kV.

Toutefois, ces composants ont deux inconvénients : d'abord, ils réagissent aux surtensions avec un retard de quelques microsecondes, temps nécessaire pour que l'arc s'amorce. Ensuite, sur les réseaux d'énergie, ils provoquent un court-circuit que doit éliminer le disjoncteur d'entrée. Certains éclateurs sont parés d'un dispositif spécial afin de souffler l'arc et d'éviter le maintien du court-circuit. Ils sont donc réputés autoextinguibles.

### 6.2.3.2 Varistances à oxyde de zinc (ZnO)

Ce sont les composants les plus utilisés aujourd'hui. Ce sont des céramiques à base d'oxyde de zinc dopées par des composants donnant un effet non linéaire. Cela signifie que la résistance a une très grande valeur vis-à-vis de la tension de service de l'alimentation mais cette valeur s'effondre lorsqu'une surtension se présente à ses bornes, ce qui entraîne, pour conséquence, un efficace effet d'écrêtement. La résistance reste néanmoins suffisamment élevée pour ne pas conduire à un court-circuit. Selon le diamètre et l'épaisseur de cette céramique, et en empilant plusieurs d'entre elles si nécessaire, ces varistances sont capables de protéger les équipements et composants de toute tension. Les critères de choix sont principalement le niveau de protection qui caractérise leur aptitude à écrêter les surtensions et leur capacité d'écoulement de courant de foudre (courant maximal de décharge).

### 6.2.3.3 Composants solides à base de silicium (diodes Zener)

Ils se caractérisent par des niveaux de protection très bas, de l'ordre de la dizaine de volts et sont donc bien appropriés à la protection des circuits informatiques. Par contre, leur pouvoir d'écoulement des courants de foudre est faible. Il faut les connecter au plus près des équipements sensibles et ils doivent toujours être associés à des composants plus robustes comme les varistances ou les éclateurs à gaz, installés en amont. Cependant, des dispositifs récemment développés, qui garantissent la protection même en fin de vie des diodes Zener, permettent de les utiliser seuls.

### 6.2.3.4 Coordination de parafoudres (encore appelée mise en cascade)

Le parafoudre placé à l'entrée de l'installation, pour l'équipotentialité avec le paratonnerre, doit être de forte énergie car une partie du courant de foudre circulera dans celui-ci. Mais il est souvent incapable de garantir en même temps un bon niveau de protection. Dans ce cas, ce parafoudre d'entrée doit être associé à d'autres parafoudres de niveau de protection plus faible (donc offrant une meilleure protection) et de capacité d'écoulement plus faible, installés au plus près des matériels sensibles. La coordination de ces parafoudres doit être soigneusement étudiée car il y a risque que le parafoudre de plus bas niveau de protection soit détruit avant que le parafoudre amont ne puisse réagir. On utilise généralement un élément de couplage qui peut être une longueur de ligne ou une inductance. Certains parafoudres sont coordonnables avec des longueurs très faibles (1 m ou moins). Ces données sont généralement incluses

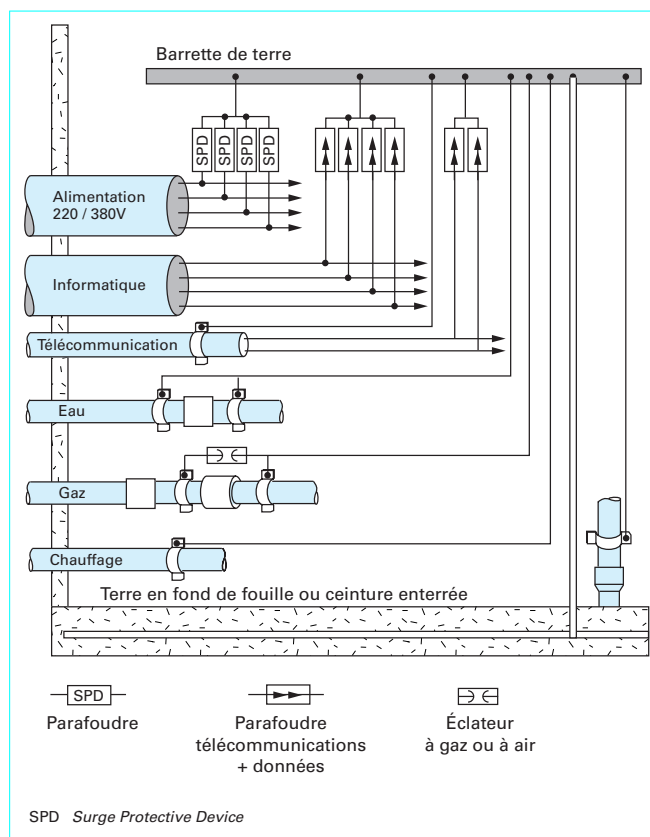


Figure 15 – Schéma des dispositifs de protection intérieure

dans la documentation des fabricants de parafoudre. Signalons toutefois que des dispositifs de protection très élaborés ont été mis au point, qui permettent de s'affranchir de la nécessité d'une cascade (cf. diodes Zener).

La figure 15 donne le détail des dispositifs de protection intérieure. Elle montre la manière d'installer ces dispositifs de protection contre les surtensions.

#### 6.2.3.5 Dimensionnement des parafoudres d'équipotentialité

On considère, que quand un choc de foudre frappe un paratonnerre, on a en général 50 % du courant de foudre qui circule dans la prise de terre du paratonnerre et 50 % du courant de foudre qui circule dans les autres éléments reliés à la structure (canalisations, réseau d'énergie et de télécommunication...). On estime que le réseau de télécommunication ne peut drainer que 50 % du courant de foudre, compte tenu de son impédance. Le réseau d'énergie, pour sa part, peut drainer jusqu'à 50 % du courant de foudre réparti équitablement entre les différents conducteurs (phase et neutre). Des études plus poussées montrent qu'en fait c'est surtout le neutre qui est contraint (2 à 5 fois plus que les phases). La valeur de 50 % est une valeur maximale et, bien souvent, ce chiffre est plutôt égal à 30 % du choc de foudre initial.

Une étude récente a montré qu'un parafoudre dimensionné à  $I_{\max} = 65 \text{ kA}$  (8/20) aura un taux de défaillance de 1 tous les 100 ans en cas de choc de foudre sur le paratonnerre dans un site où la densité de foudroiement est de  $N_S = 1$  coup par an et par  $\text{km}^2$  pour un bâtiment de 10 m de haut.

Le guide UTE 15-443 (cf. [Doc. C 3 307]) recommande une valeur de  $I_n$  (courant nominal) = 20 kA (8/20) pour les parafoudres d'énergie installés à l'entrée du bâtiment protégé par un paratonnerre. Cela correspond à un courant maximal  $I_{\max}$  compris entre 40 et 65 kA (8/20) selon la technologie du parafoudre.

**Nota :** pour plus de détails concernant les choix des caractéristiques des parafoudres et les règles d'installation, ou se référer à l'article [D 4 840] *Parafoudres basse tension* des Techniques de l'Ingénieur.

## 7. Paratonnerres à dispositifs d'amorçage et tests associés

### 7.1 Paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA)

Ils sont encore appelés ESE, de l'anglais *Early Streamer Emission*.

Ces dernières années ont vu l'apparition de différents dispositifs destinés à améliorer l'efficacité des paratonnerres à tige de type Franklin et, en particulier, à remplacer les dispositifs radioactifs interdits par la loi dès 1986. La France a été particulièrement impliquée dans ces recherches, mais d'autres pays comme l'Australie y ont aussi fortement contribué. Ces recherches sont désormais bien établies et validées par des essais en laboratoire, voire sur site, et correspondant d'ailleurs déjà à des produits industriels.

Pour améliorer l'efficacité d'un paratonnerre à tige, on ne peut agir que sur la décharge ascendante. Toute discussion sur l'efficacité vise donc à voir comment on peut faire démarrer cette décharge ascendante le plus tôt possible avec la meilleure vitesse initiale. L'idée est donc de jouer sur l'effet couronne aléatoire et de le « piloter », c'est-à-dire soit d'essayer de l'organiser, soit de le renforcer en lui donnant une intensité plus importante. Autour de cette idée, deux voies sont à explorer :

- **haute tension impulsionnelle** : on applique une haute tension impulsionnelle répétitive à l'extrémité du paratonnerre, l'idée sous-jacente étant d'organiser cet effet couronne initial et de bénéficier d'un effet de mémoire laissé par les décharges précédentes (action des molécules métastables) ;

- **étincelage au voisinage de la pointe** : on provoque l'étincelage au voisinage de la pointe afin d'assurer la présence d'électrons initiaux en corrélation avec la montée du champ électrique.

En pratique, un PDA de taille égale à une tige de Franklin conduit à une initiation plus rapide de la décharge ascendante, ce qui peut se représenter suivant certains auteurs comme un rayon de protection plus grand (figure 16) ou, pour un rayon de protection identique, par un accroissement important de la fiabilité du paratonnerre à tige.

Cependant, l'efficacité d'un tel PDA doit être validée par des essais spécifiques (§ 7.2).

### 7.2 Efficacité comparée d'un PDA et d'une tige de Franklin

Pour tester l'efficacité d'un paratonnerre, la meilleure façon est de le comparer à un dispositif de référence de taille équivalente, par exemple une tige de type Franklin. De tels essais sont réalisables en laboratoire pour peu que l'on dispose d'espace suffisant, d'une source de polarisation continue et d'un générateur de chocs de manœuvre. Plusieurs laboratoires en France sont capables de réali-



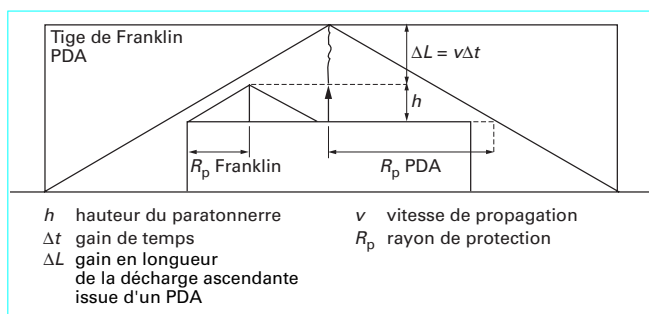


Figure 16 – Évaluation du gain en hauteur pour un PDA

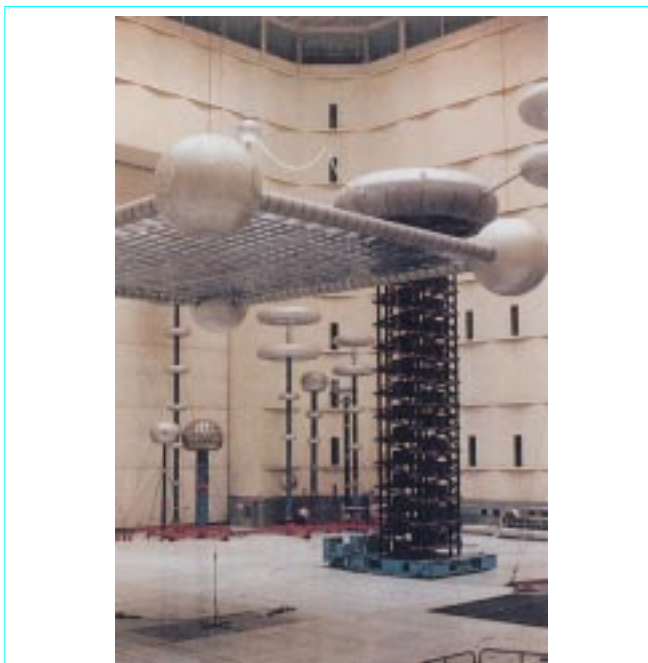


Figure 17 – Essais de PDA au Laboratoire de Génie électrique d'EDF (doc. Helita)

ser de tels essais en particulier le LGE (Laboratoire de Génie électrique) d'Électricité de France à Moret-sur-Loing (77). Cet essai est réalisé en appliquant sur un plateau à la fois un champ permanent et un champ impulsionnel. Le paratonnerre en essai et le dispositif de référence sont tour à tour placés au même endroit sur le sol centrés au-dessous du plateau (figure 17). Le champ continu vaut alors environ 15 à 20 kV/m, ce qui correspond à la distribution de charge présente dans le nuage. Le champ impulsionnel, dû à l'approche du traceur descendant, est simulé par une onde dont le temps de front est compris entre 200 et 1 200  $\mu s$  (onde de manœuvre).

Il est à noter que le volume libre utilisé pour les essais doit être suffisamment large pour permettre à la décharge ascendante de se

développer librement. Ainsi, le diamètre du plateau supérieur doit-il être au moins égal à la distance entre le plateau et le sol. De même la distance entre la pointe du paratonnerre et le plateau doit être au moins de 2 m.

Les essais sont menés afin de comparer les temps d'initiation moyens de la décharge ascendante issue de la tige de référence et du PDA. Pour le PDA, les temps d'initiation sont, en moyenne, plus courts que pour la tige de référence.

De tels essais sont particulièrement utiles, voire nécessaires, pour tester l'efficacité des PDA. Pour plus de précision dans les essais, la tige de Franklin de référence peut être obtenue à partir du paratonnerre PDA en « court-circuitant » le dispositif d'amorçage. On a ainsi une tige de Franklin exactement dans les mêmes conditions géométriques.

## 8. Conclusion

La protection contre la foudre consiste à prendre en compte tous les dispositifs mis en jeu depuis le dispositif de capture jusqu'à ses extrémités les plus lointaines : prises de terre ou barre d'équipotentialité par exemple. Il faut prévoir, autant que faire se peut, à l'origine de la conception de l'installation, l'emplacement des conducteurs de descente, naturels ou non, et aussi les prises de terre et leurs interconnexions, entre elles et avec le réseau électrique ou de télécommunications. C'est pourquoi il est préférable de parler de **système de protection contre la foudre** qui est plus général que le terme usuel de paratonnerre.

Nous ne saurions mieux conclure qu'en citant P.G. Laurent, qui fit beaucoup pour le renouveau en France, après-guerre, de l'intérêt pour les recherches sur la foudre :

« Le courant de foudre est un courant électrique comme les autres, qui circule suivant les lois ordinaires de l'électrotechnique, dont on peut prévoir le comportement dans la mesure où la configuration du système se prête au calcul et que l'on peut étudier à tension réduite au moyen de générateurs de choc.

« Nous pensons que tous les moyens pratiques de protection contre la foudre se ramènent à un seul : offrir au courant un chemin conducteur aussi direct que possible et y interconnecter tous les éléments métalliques voisins. La foudre est un personnage important auquel on ne résiste pas sans danger, mais qui se laisse diriger assez facilement quand on se plie à ses désirs. Elle dispose de millions de volts pour briser les obstacles isolants, mais s'écoule inaperçue dans des conducteurs de petit diamètre. Si elle a la curiosité, au cours de sa descente, d'explorer des masses ou des conducteurs métalliques voisins où elle pense, à tort ou à raison, trouver un exutoire plus facile, il vaut mieux l'y aider par des interconnexions appropriées que lui opposer des obstacles qui risquent généralement de présenter un point faible.

« Ce langage quelque peu animiste traduit la réalité physique : la foudre tâte l'espace avoisinant grâce à l'espèce de sensibilité que lui procure le champ électrique qu'elle propage avec elle, et le même champ lui procure un moyen d'action qui consiste à perforer les isolants en leur appliquant sa contrainte électrique.

L'idée essentielle de tout système de protection doit être de lui éviter les occasions de mettre ce moyen en œuvre. »

Ce texte reste parfaitement d'actualité.