

## LA Foudre

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre des nuages d'orage, entre un tel nuage et la terre ou vice versa.

La différence de potentiel électrique entre les deux points peut aller jusqu'à 100 millions de volts et produit un plasma lors de la décharge, causant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur. En se dissipant, ce plasma crée un éclair de lumière et le tonnerre.

La foudre a tendance à frapper les régions de haute altitude et les objets proéminents. Le tonnerre peut résonner d'un craquement sec lorsque l'éclair est proche ou gronder au loin.

Comme la lumière voyage plus vite que le son, l'éclair est visible avant que le tonnerre ne soit audible.



### La charge

Les nuages d'orage (cumulonimbus) créent les conditions météorologiques favorables à l'accumulation de charges électriques et, par conséquent, à la création d'un condensateur géant.

Une différence de température importante entre le bas et le haut du nuage, induisant de violents déplacements d'air.

La présence de particules diverses comme de la glace et des poussières vont faciliter l'arrachement ou l'ajout d'électrons.

L'air étant électriquement chargé, il se crée dans le nuage des zones à potentiel électrique différent : négatif à sa base et positif à son sommet. Il s'ensuit un champ électrique très important.

L'électrisation du nuage d'orage est basée sur deux phénomènes : la gravitation et la convection.

### La gravitation

Les gouttes de pluie, les grêlons et les particules de grésil (de petits grains de glace) tombent par gravité vers le bas du nuage, au-dessous des gouttes d'eau et des cristaux de glace de taille inférieure qui restent en suspension.

Lorsque les grosses particules entrent en collision avec les cristaux de glace à une température inférieure à une limite critique, autour de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , les grains de grésil se chargent négativement, et positivement si cette température est supérieure à ladite limite.

Comme les grains tombent plus rapidement que les cristaux, ils transportent depuis les zones supérieures du nuage, où les températures sont inférieures à  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , des charges négatives vers le bas.

Le seuil des  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  dépassé, celles-ci deviennent positives. On obtient alors une structure tripolaire du nuage avec une couche médiane chargée négativement entourée de deux couches positives. Cependant, les chocs entre particules ne sont pas seuls à l'origine de l'électrisation du nuage.

### La convection

Les ions libres dans l'atmosphère sont captés par les gouttelettes dans le nuage qui sont ensuite déplacées dans les courants verticaux créés par le mécanisme de la convection. Ceci produit des accumulations de charges différentes selon l'altitude dans le nuage.

D'une part, les rayons cosmiques frappent les molécules d'air situées au-dessus du nuage et les ionisent.

Enfin, le champ électrique intense au voisinage des objets pointus à la surface de la terre produit une décharge d'ions positifs : quand le potentiel de l'objet pointu est suffisant, un champ électrique intense produit l'excitation des électrons avoisinant.

Ceux-ci entrent alors en collision avec des atomes neutres, qui libèrent alors de nouveaux électrons qui vont, à leur tour, créer d'autres électrons et ainsi de suite, provoquant une réaction en chaîne. C'est l'avalanche électronique ou ionisation par choc.

### La décharge

Lorsque ce champ électrostatique dépasse les limites diélectriques de l'air (variables selon les conditions d'humidité et de pression), il s'ensuit la décharge de foudre conduisant à un rééquilibrage électrostatique.

Ce qui se passe ensuite pour un éclair nuage-sol se fait en trois étapes : la décharge arrache des électrons aux molécules de l'air, créant ainsi un canal ionisé appelé traceur ou précurseur qui transporte une faible charge électrique, avance vers une zone de charge opposée à une vitesse de l'ordre de 200 km/s.

Une seconde décharge suit, prolongeant le traceur de quelques dizaines de mètres. Ce précurseur progresse par bonds de longueurs proportionnelles à l'amplitude de la décharge.

les charges positives accumulées sous l'orage, en réponse à l'approche de la charge négative des précurseurs, ont tendance à se concentrer sur des objets élevés et pointus, tels que les arbres, les poteaux et les bâtiments, un phénomène que tentent d'exploiter les paratonnerres.

Cela initie à un certain moment un *traceur* vers le nuage ;

quand les deux se rejoignent, en général à moins de 100 mètres du sol, un arc électrique en retour se déclenche.

Il libère les charges électriques accumulées et donne l'éclair proprement dit et le courant se propage à une vitesse qui peut atteindre 100 000 km/s

### Eclair

Le long du chemin parcouru, la décharge peut atteindre 100 millions de volts, ce qui surchauffe les gaz et les ionise (la température peut y atteindre 30 000 °C, cinq fois celle de la surface du soleil).

Ceci forme un plasma conducteur, ce qui explique l'émission soudaine de lumière que l'on observe. Ce phénomène lumineux est appelé éclair.



## Fréquence

La foudre est l'objet d'études statistiques car il y a de nombreuses différences de caractéristiques (amplitude, durée, nombre d'arcs en retour) suivant l'éclair (intra-nuage, nuage-sol, positif, négatif) :

Selon une étude française, 50 % des coups de foudre ont une intensité inférieure à 50 000 A et 99 % inférieure à 200 000 A. Environ 60 % des décharges sont intra ou inter-nuageuses.

La fréquence des coups de foudre est définie à partir du niveau kéraunique (nombre de fois où le tonnerre a été entendu dans l'année) et surtout de la densité de foudroiement (nombre de coups de foudre au km<sup>2</sup> par an).

Ce dernier mode de quantification peut être alimenté par des moyens de mesure, les détecteurs de foudre : moulin à champs, antennes directionnelles et capteurs par satellites.

## Tonnerre

La foudre s'accompagne d'une onde acoustique, le *tonnerre*. Cette onde est engendrée par la dilatation brutale de l'air surchauffé par l'arc électrique.

Elle peut consister en un bruit sec ou un roulement sourd selon la distance séparant l'auditeur de la foudre.

La vitesse du son permet une bonne approximation de la distance qui sépare un observateur d'un éclair. Dans l'air, à pression atmosphérique et à 15 °C, le son parcourt 340,88 mètres en 1 seconde.

Ainsi, la durée qui sépare la perception visuelle d'un éclair (pratiquement instantanée puisque la lumière se déplace à presque 300 000 km/s) de la perception auditive du tonnerre, permet de calculer la distance qui sépare l'observateur de l'éclair.

Par exemple, pour une durée de 10 s, la distance entre l'observateur et l'éclair sera de  $10 \times 340,88 = 3408,80$  mètres, soit environ 3,4 km.

Naturellement, la pression et la température réelle de l'air vont changer cette valeur mais de très peu dans les conditions normales

## Dangers

Chaque année, en France, environ 2 millions de coups de foudre sont enregistrés par les systèmes de détection, et près de 250 clochers sont plus ou moins gravement endommagés par le "feu du ciel" qui provoque également entre 15 000 et 20 000 incendies.

Il s'ensuit la génération d'impulsions électriques parasites très puissantes, qui sont majoritairement en cause dans les dégâts d'après les statistiques.

Ces parasites suffisent en effet à dégrader des matériels électroniques sensibles (téléviseurs, ordinateurs, etc.) même si l'éclair est éloigné. Si l'éclair est plus proche, le parasite peut aussi détruire des matériels plus résistants (lampes, moteurs, fours...).

## La conduction

Le foudroiement direct d'animaux (ou personnes) est très rare. Cependant, lorsque la foudre frappe la terre, les charges électriques se dissipent dans le sol dont le potentiel électrique devient plus ou moins important suivant la nature du sol (sa résistivité) et la distance à l'impact.

La différence de potentiel (tension) entre deux points est d'autant plus importante que l'écart est grand (amplitude d'un «pas»), pour une résistivité donnée. Plus cette tension est importante, plus le courant qui peut alors circuler par les membres inférieurs est important.

## Détection

Il existe différents systèmes de détection de la foudre :

Le moulin à champ est un instrument de mesure d'un champ électrique statique. En météorologie, cet instrument permet, grâce à l'analyse du champ électrostatique au-dessus de lui, de signaler la présence d'un nuage électriquement chargé traduisant l'imminence de la foudre.

Réseau d'antennes réceptrices qui reçoivent le signal radio généré par la décharge.

Détection par satellite artificiel des éclairs produits par les orages en balayant la zone de vision pour la détection des flashes lumineux. On utilise pour cela des satellites géostationnaires comme les GOES et METEOSAT qui se situent à environ 36 000 km de la Terre.

Les réseaux de détecteurs de foudre sont utilisés par les services météorologiques comme Météo-France pour suivre les orages et prévenir les populations.

## PROTECTION

**Le paratonnerre** va faciliter le chemin du canal foudre par effet de pointe.

Le paratonnerre sera efficace à condition d'être en présence d'un coup de foudre descendant dont le précurseur avance par bonds successifs ; ce qui est le cas dans 90 % des coups de foudre. Il est, ensuite, très important d'assurer une continuité électrique de grande capacité jusqu'à la terre.

Ce procédé ne garantit pas l'interception d'un arc électrique, qui peut tomber juste à proximité. Pour cette raison, les constructions industrielles sensibles sont équipées de nombreuses pointes et filins conducteurs.

Il est aussi conseillé de réaliser l'interconnexion de toutes les parties conductrices présentes aux abords (par exemple les conduites d'eau) avec ce circuit de descente de foudre.

Une bonne liaison équipotentielle de toutes les pièces métalliques du bâtiment connecté au puits de terre, constituée d'un réseau de conducteurs nus et enterrés, en contact intime avec le sol, qui doit permettre de disperser "facilement" les courants dans le sol. Pour ce faire, ces conducteurs doivent présenter une faible résistance à la terre, ce qui permet en outre de limiter les surtensions susceptibles d'apparaître sur les liaisons électriques extérieures qui pénètrent dans l'installation à protéger.

Des conducteurs de descente, qui assurent la jonction entre le dispositif de capture et le puits de terre.

**Des para-surtenseurs** au niveau du tableau électrique principal afin de dissiper toutes les charges électriques qui pourraient circuler sur le réseau électrique du bâtiment (entre autres par induction, même sans contact direct avec la foudre) et risqueraient d'endommager les appareils branchés à l'installation électrique.

Toutefois, l'installation d'un paratonnerre ne prend pas en compte les effets indirects de la foudre sur une installation.

La circulation du courant foudre sur les conducteurs du dispositif génère un champ magnétique impulsionnel intense qui peut perturber voire détruire certains constituants de l'installation électrique du bâtiment à protéger.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées afin de limiter ces effets :

- Eloigner les conducteurs de capture et de descente de l'installation à protéger.
- Multiplier ces conducteurs de manière à diviser les courants.
- Augmenter l'atténuation propre à la structure de l'installation.
- Améliorer l'équi-potentialité des masses métalliques de l'installation.
- Apporter un traitement particulier au câblage de l'installation.

La protection des installations électriques contre les surtensions produites par la foudre sur les conducteurs actifs des liaisons électriques est réalisée par l'utilisation de composants para-surtenseurs (parafoudres, éclateurs à gaz, ...) qui ont pour but de court-circuiter les impulsions parasites cheminant sur les liaisons électriques en dérivant la majeure partie de l'énergie de l'impulsion directement vers la terre. Le bon câblage de ces composants est essentiel à leur efficacité ainsi que la longueur et la position des câbles, qui jouent en effet un rôle primordial.

**Normalisation en France**

Le dimensionnement d'un dispositif extérieur de protection foudre est régi en France par les normes NF EN 62 305 et NF C 17-100, qui proposent une méthode d'analyse de risque à partir de paramètres tels que la sensibilité d'une installation et son exposition au phénomène foudre, estimée à partir de statistiques de foudroiement de la zone géographique dans laquelle l'installation à protéger se situe.

Cette analyse aboutit à la détermination d'un niveau de protection à apporter et à partir duquel la norme propose un dimensionnement adéquat du dispositif extérieur de protection de l'installation.

L'analyse de risque proposée par la norme NF EN 62305-2 est beaucoup plus fine, mais également plus difficile à appliquer, que celle de la norme NF C 17-100.

Également, la norme NF EN 62305-4 permet de prendre en compte les effets de l'impulsion magnétique créée par un impact foudre sur une installation électrique, contrairement à la NF C 17-100 qui ne traite que des effets directs.

En ce qui concerne les parafoudres à placer sur les liaisons d'alimentation en entrée d'une installation électrique, se référer à la norme NF EN 61643-11 pour le choix des caractéristiques de ces composants et au guide UTE C 15-443 pour des préconisations sur leur intégration dans l'installation électrique.

La norme NF C 15-100 donne quelques informations à ce sujet mais renvoie essentiellement à ces deux textes. Les liaisons de communications entre installations peuvent également nécessiter une protection par parafoudres en entrée d'installation électrique, auquel cas c'est vers la norme NF EN 61643-21 qu'il conviendra de se tourner.