

## Les effets de la foudre – Comment s'en protéger ?

INDELEC - Protection Foudre

La foudre est un phénomène qui, depuis la nuit des temps, a hanté l'esprit des hommes au point qu'elle a revêtu un caractère divin à travers les âges. L'étude, décorrélée de ses considérations superstitieuses, a atteint son apogée au milieu du siècle des lumières grâce notamment à Benjamin Franklin, l'abbé Nollet, le comte de Buffon, Thomas François Dalibard, Delor et Jacques de Romas.

Il fût ainsi prouvé que le nuage orageux était électrique et qu'une tige effilée reliée à la terre était capable de capter et d'écouler le courant de foudre à défaut de décharger le nuage par effet de pointe, aussi connu sous le nom d'effet couronne ou effet Corona ou encore Feux de Saint Elme.

Tout commence avec l'apparition d'une cellule orageuse (cumulo-nimbus) . Les charges électriques sont réparties verticalement dans l'épaisseur du nuage de plusieurs kilomètres selon deux catégories de théories gravitationnelles et convectives. Les charges négatives sont réparties dans la zone de température comprise entre  $-5$  et  $-25^{\circ}\text{C}$  alors que les charges positives se trouvent entre  $-20$  et  $-60^{\circ}\text{C}$ .

La théorie gravitationnelle indique la possibilité aux gouttes de capturer des aérosols ionisés atmosphériques et de se ioniser grâce au champ de beau temps (champ électrique naturel présent par beau temps d'environ  $+150\text{V/m}$ ). Ces gouttes, lors de précipitations, entrent en collision et les petites gouttes ainsi créées, transportant les charges positives, remontent en suivant le champ électrique répartissant ainsi les charges dans le nuage.

La théorie convective repose sur les courants ascendants présents au sein du nuage dont le sommet peut atteindre 15km. La convection naît de l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement du sol, la condensation en altitude forme le nuage. Le courant ascendant sépare les charges issues des collisions et les porteurs légers remontent par le courant ascendant. La partie supérieure du nuage est donc constituée de cristaux de glace chargés positivement et les porteurs de charges négatives plus lourds se retrouvent à la base du nuage. La température, en fonction de l'altitude, joue un rôle dans la nature des charges présentes ainsi que les rayonnement cosmique.

Le nuage ainsi électrisé présente des valeurs de champ extrêmement élevées permettant, dans l'immense majorité des cas, la naissance des phénomènes précurseurs conduisant à la foudre.

Le nuage électrisé se présente donc sous la forme d'un condensateur géant (dipôle vertical) dont l'armature négative est proche du sol. Par effet d'influence (effet capacitif), le sol se charge positivement et il y a formation d'un condensateur dont la terre et la base du nuage composent les armatures. La différence de potentiel est estimé à une centaine de millions de volts.

Le champ électrostatique résultant au sol est modifié localement par les aspérités (collines, arbres, bâtiments, ...). Les lignes de champ sont « comprimées » sur les aspérités, ce qui donne une amplification locale du champ électrique concentrée sur l'extrémité de ces aspérités. Si le champ ambiant est assez fort (orage), on observe sur cette aspérité, grâce au coefficient d'amplification, un effet « dit de pointe » ou Corona. L'air est donc ionisé de manière importante et peut même produire des effluves bleutées visibles (Feux de Saint Elme).

Les conditions pour un impact de foudre au sol sont donc réunies. Les hydrométéores (pluie grêle, cristaux) contenus dans le nuage renforcent le champ interne (plusieurs centaines de  $\text{kV/m}$ ) par effet Corona sur leur propre structure qui peut conduire à des mécanismes de cascade électronique jusqu'à la production d'une étincelle électrique. Suivant la direction du champ, la microdécharge se propage de proche en proche en s'autoalimentant des charges créées par cascade. On est alors en présence de traceurs qui peuvent se diriger vers le sol dans le sens du champ électrique régnant au sein du condensateur « base du nuage / sol ». On parle alors de traceur descendant par bonds qui évolue de manière saccadée à la vitesse moyenne de  $0,1\text{m}/\mu\text{s}$ .

Ce traceur descendant se dirigeant vers le sol réduit la distance inter-armatures de manière très rapide et donc le champ électrique au sol augmente très nettement. Cette augmentation du champ conjuguée au coefficient d'amplification de l'aspérité au sol fait que l'ionisation au sommet de cette aspérité va atteindre la valeur critique de 26kV/cm. Cette valeur critique correspond à la propagation de l'ionisation créée (effet Corona) au sommet de l'aspérité. Un traceur ascendant positif est ainsi engendré et se dirige naturellement vers le traceur descendant négatif à la vitesse moyenne d'1m/μs. La jonction des deux traceurs forme un canal conducteur composé de plasma qui servira de conducteur électrique où la majeure partie des charges du nuage vont pouvoir s'écouler de manière quasi-instantanée (quelques μs) vers la terre : c'est l'arc en retour (foudre). Suivent ensuite les arcs subséquents qui empruntent le même canal ionisé qui peut lui-même se déplacer sous l'effet du vent. Il peut y avoir jusqu'à une douzaine d'arcs nuage-sol espacés de 10 à 100ms dans le même événement foudre. Le courant de décharge moyen est de 30kA et peut même atteindre 200kA.

On comprend donc aisément la nécessité de se protéger de ces phénomènes électriques atmosphériques destructeurs. En complément à la protection directe, il convient de protéger l'installation contre les effets indirects, surtensions (induction, couplage capacitif) et étincelage, à l'aide de règles de câblage, de parasurtenseurs (parafoudres) et de liaisons équipotentielles.

Il existe plusieurs systèmes conventionnels qui ont pour rôle de protéger contre les impacts directs de foudre. Ce sont les pointes simples « dites de Franklin », les cages maillées, les fils tendus ou encore les cages de Faraday, tout ces systèmes étant reliés à la terre. Ils sont tous composés d'un dispositif de capture de la foudre, d'un conducteur de descente pour acheminer le courant et d'une prise de terre spécialisée pour écouler ce courant dans de bonnes conditions. Toutes ces solutions éprouvées qui découlent directement des travaux du XVIII<sup>ème</sup> siècle ne proposent malheureusement pas un rayon de protection suffisamment large afin de pouvoir espacer les dispositifs de capture ou encore d'alléger le coût de la protection directe.

Une autre solution, inventée au début du XX<sup>ème</sup> siècle avec la découverte de la radioactivité, utilisait les propriétés ionisantes de sources radioactives placées à proximité de la pointe. Ce dispositif, sensé augmenter le pouvoir de capture de la pointe, a été interdit il y a 20 ans. Le milieu des années 80 a donc vu l'apparition de la première génération de paratonnerres « dits actifs » grâce à la société INDELEC. Le principe de base est énoncé comme suit : comme le traceur ascendant se connecte au traceur descendant pour créer le canal d'écoulement de la décharge, le paratonnerre a donc intérêt à pouvoir « émettre » un traceur ascendant avant les aspérités de la structure à protéger afin que celui-ci se connecte le premier au traceur descendant, définissant *de facto* le paratonnerre comme le récepteur privilégié de la décharge. Cette nouvelle classe de paratonnerres exploite donc ce principe d'avance à l'amorçage et est nommée PDA (Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage).

L'avantage certain de cette nouvelle classe est l'augmentation de la zone de protection par rapport aux systèmes conventionnels. En effet, plus tôt (dans une certaine mesure) le traceur ascendant est émis, plus grande est la zone de protection. Cette avance à l'amorçage, définie (NF C 17102) par rapport à une pointe simple (de Franklin) et se mesurant en μs, est permise grâce au dispositif d'amorçage. Ce dispositif (technologie Prelectron<sup>®</sup> d'INDELEC), en synchronisme avec l'apparition du traceur descendant, crée de manière anticipée les conditions stables d'apparition du traceur ascendant. En effet, l'avalanche électronique au sommet de la pointe soumise au coefficient d'amplification du champ électrique, se produit plus tôt. Cette technologie, en constante évolution par INDELEC, a été confrontée à une pointe simple en laboratoire THT et en conditions réelles lors de campagnes d'essais de foudre déclenchée depuis 1993 dans des zones fortement foudroyées (Floride, France, Japon, Brésil) en collaboration avec des organismes prestigieux (CEA, France Telecom R&D, Universités et Instituts étrangers).

Grâce à ces outils de tests et d'essais ainsi qu'à l'expérience acquise dans l'installation depuis 1955, INDELEC continue sa politique R&D afin de proposer des produits relatifs à la protection foudre les plus performants.