

Les éclairs cernés

Vers la fin des années 1970, des physiciens de l'Université d'Albany ont constitué un petit réseau d'antennes directionnelles afin de suivre les éclairs entre les nuages et le sol sur une petite superficie de l'État de New York. Ce réseau de détecteurs s'est

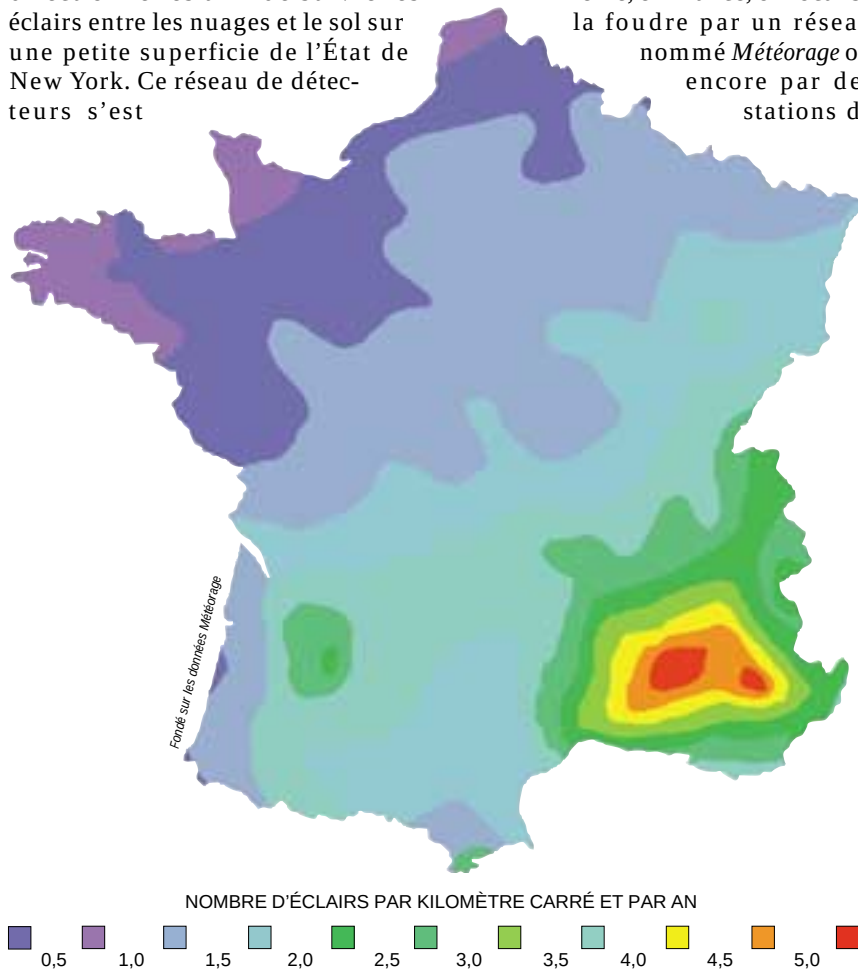
progressivement étendu à d'autres États, au cours des années 1980, de sorte qu'en 1991 ce groupe d'antennes pouvait détecter la chute de la foudre n'importe où aux États-Unis. De même, en France, on localise la foudre par un réseau nommé *Météorage* ou encore par des stations de

type SAFIR, qui captent les ondes de très haute fréquence.

Ces réseaux se composent de stations (105 aux États-Unis, 17 en France) qui observent la foudre en mesurant les temps et direction exacts des impulsions électromagnétiques engendrées par les décharges. Les stations transmettent leurs mesures à un satellite, qui les renvoie vers un centre de contrôle, où des ordinateurs traitent l'information et préparent des synthèses qui sont ensuite diffusées à des centaines d'abonnés : compagnies de distribution d'électricité, compagnies aériennes, armée de l'air... Certaines compagnies de distribution de l'électricité utilisent l'information qui leur est fournie pour renforcer les couloirs de ligne d'énergie électrique susceptibles d'être perturbés par la foudre, d'autres pour réparer plus rapidement les installations. Toutefois les gestionnaires de réseau électrique ne peuvent pas encore prévenir les dégâts aux lignes à haute tension, aux pylônes ou aux autres structures vulnérables.

Deux d'entre nous (R. Bernstein et K. Stahlkopf) et des collègues de l'Institut de recherche sur la production d'électricité ont poussé la Société *Power Technologies* à construire une installation spéciale, en vue de tester la résistance de diverses structures souterraines ou de surface. Plutôt que d'attendre la chute aléatoire de la foudre, les ingénieurs du centre peuvent provoquer des décharges en lançant de petites fusées qui déroulent un mince fil relié à la terre.

Contrairement à ces coups de foudre déclenchés, les éclairs naturels commencent par un précurseur



2. LE RÉSEAU FRANÇAIS DE DÉTECTION DE LA FOUDRE MÉTÉORAGE recense les coups de foudre pour l'ensemble de la France. En mesurant l'instant et la direction des impulsions électromagnétiques produites par la foudre, ce réseau de capteurs localise les éclairs et détermine automatiquement leurs caractéristiques (pour connaître la densité de foudrolement sur l'une des 36 000 communes de France, vous pouvez utiliser le Minitel, au 3617 METEORAGE).



Tom Wahlmut, Electric Power Research Institute



Ralph Bernstein

3. DES FUSÉES déclenchent des éclairs. Le petit missile de gauche porte à sa base une bobine de fil de cuivre très fin qui se déroule au cours du vol (au centre). Une première décharge suit alors préfé-



Ralph Bernstein

rentiellement le fil conducteur et crée un canal conducteur d'air ionisé ; les décharges suivantes ont des trajectoires plus complexes, parce que le vent déforme le canal conducteur (à droite).

à peine visible, qui se propage du nuage vers le sol par paliers, arrachant en chemin des électrons aux molécules de l'atmosphère et créant un canal d'air ionisé qui sert de conducteur. Dès que le précurseur a atteint le sol, une phase «d'arc en retour» brillante et énergétique jaillit. Cette dernière, qui transporte des courants d'intensité comprise entre 5 000 et 300 000 ampères (les conducteurs domestiques ne supportent guère plus de 60 ampères), est alimentée par la différence de potentiel considérable (plusieurs centaines de millions de volts) qui s'est préalablement établie entre le sol et les nuages ; sur son passage, elle détruit tout ce qui est isolant ou tous les conducteurs trop fins.

Éviter les catastrophes

Les faisceaux lasers devraient bientôt servir de paratonnerres perfectionnés pour détourner la foudre des régions où elle pourrait causer de



Tom Wohlmuth, Electric Power Research Institute

4. DES «FULGURITES» sont produites quand la foudre fait fondre le sol en s'y enfonçant. Cette photographie montre comment la foudre a atteint un câble électrique souterrain qui semblait pourtant à l'abri, à un mètre de profondeur, dans le sol.

graves dégâts. Il y a quelques décennies, des ingénieurs avaient supposé que l'on pourrait déclencher des éclairs en utilisant l'énergie des lasers pour ioniser l'air et créer des canaux conducteurs, mais leurs expériences échouèrent, parce que leurs lasers ionisaient tant l'air qu'il devenait opaque aux faisceaux, et bloquait leur propagation.

Deux équipes japonaises ont récemment tenté d'éviter cet effet en utilisant des lasers infrarouges : au lieu de créer un tunnel continu de particules ionisées, les physiciens ont mis au point une méthode pour focaliser un ou plusieurs faisceaux laser en un chapelet de points où se créent des bulles de plasma. Au cours de tests, en laboratoire, ils ont déclenché une décharge de plus de sept mètres de long (mais avec des champs électriques considérables, qui mettaient l'air à la limite du claquement spontané).

Deux d'entre nous (J.-C. Diels et M. Zhao) ont plutôt utilisé le rayonnement ultraviolet émis par un laser



Stan Gryzbowski, Mississippi State University High Voltage Laboratory

5. UNE DÉCHARGE ÉLECTRIQUE (en haut à gauche) se produit dès que deux faisceaux laser ont ionisé l'air, entre deux électrodes. Le système laser des auteurs (en bas à gauche) est trop encombrant pour être déplacé jusqu'aux installations de haute tension de l'Université du Mississippi (ci-dessus), mais un nouveau laser mobile devrait bientôt provoquer des décharges artificielles plus longues.

de relativement faible puissance. De tels faisceaux ionisent peu les molécules d'air sur leur passage, mais les quelques électrons arrachés par les ultraviolets se combinent rapidement aux molécules neutres d'oxygène voisines, formant des ions oxygène négatifs (qui réduisent la conductibilité électrique) ; ainsi se crée une longue colonne ionisée, qui agit comme un paratonnerre : à son sommet, le champ

électrique est si intense que les décharges électriques qui se déclenchent accroissent le canal d'air devenu conducteur.

Nous avons également découvert qu'un second laser émettant de la lumière visible réduit la formation d'ions oxygène libre quand il est focalisé sur le laser ultraviolet : les photons du faisceau de lumière visible sont suffisamment énergiques pour expul-

ser les électrons des ions négatifs. Le laser ultraviolet que nous avons testé, de faible puissance, ionise remarquablement bien l'air, car il émet des impulsions lasers très courtes (moins d'un trillième de seconde) : la lumière laser peut atteindre une intensité de crête élevée, alors que la puissance moyenne consommée par l'appareil est relativement faible. De surcroît, les impulsions laser se com-

Apprivoiser le point d'impact de la foudre

Depuis l'époque de Benjamin Franklin, de Dalibard, de l'abbé Nollet et d'autres, il est bien connu que les objets pointus et élevés attirent la foudre. Mais comment quantifier le pouvoir d'attraction d'un paratonnerre ou d'une structure comme un clocher d'église ou comme la tour Eiffel ?

On sait que le processus de foudroisement met en jeu deux phases principales : la phase «précurseur» est celle où la foudre choisit sa victime. La phase de l'«arc en retour» de la foudre est caractérisée par ses effets : thermiques, électromagnétiques, sonores et lumineux. Dans le domaine de la protection des êtres vivants et des structures contre les effets de la foudre, la première phase «précurseur» est essentielle, car elle détermine le point de connexion de la foudre, et qui subira l'impact.

Jusqu'à présent, la détermination du pouvoir de captation de la foudre par une structure était fondée sur des modèles tirés principalement de l'observation expérimentale. Quelques considérations physiques permettaient en outre de mieux comprendre les observations, mais ne donnaient pas de vision cohérente des phénomènes. Ces modèles, dit semi-empiriques, se traduisaient par une relation simple entre la distance d d'attraction de la foudre par une structure, et l'intensité I du courant de l'arc en retour ($d = 10 I^{2/3}$). Ce «modèle électro-géométrique» est, encore aujourd'hui, à la base de tous les calculs de protection.

Les progrès réalisés conjointement par l'Université de Padoue et par l'Office national d'études et de recherches aéronautiques (ONERA) ont permis, ces dernières années, de décrire physiquement les différentes phases d'une décharge électrique, aussi bien lorsque les charges électriques mises en jeu dans cette décharge sont négatives que lorsqu'elles sont positives. Cette description est fondée sur une analyse pas à pas, depuis l'ionisation initiale jusqu'à la phase d'arc, ou saut final, qui conduit à la rupture diélectrique de l'air. Outre les caractéristiques du milieu où se propage la décharge, le paramètre fondamental est le champ électrique de la structure, pour laquelle est réalisée la simulation, et son évolution temporelle. Ce champ électrique, qui décrit la force électrique exercée sur la structure, doit être calculé en tous points ; c'est lui qui détermine l'existence et l'évolution du précurseur. Les calculs, fondés sur la résolution des équations

de Maxwell, sont aujourd'hui réalisés par des programmes d'ordinateur.

Ces modélisations indépendantes de toute donnée expérimentale, permettent de caractériser complètement la décharge électrique, par exemple sa vitesse de propagation, la quantité de charges drainées ou encore l'intensité du précurseur.

Ces travaux ont été adaptés, dans le cadre d'une collaboration avec *Électricité de France*, aux grandes décharges de plusieurs mètres de longueur, puis à la foudre naturelle. Encore fallait-il valider ces modèles pour des structures soumises à des contraintes réelles.

La première expérimentation a été réalisée dans le gigantesque laboratoire d'essais à haute tension des Renardières : haut de 45 mètres sous plafond, large de 65 mètres, il pourrait contenir quatre Arcs de Triomphe. La simulation a été réalisée sur des maquettes au dixième qui représentaient un avion en vol. On a ainsi observé que l'avion participait activement à son foudroisement et que les équations physiques régissant la décharge et calculées par modélisation correspondaient aux grandeurs physiques mesurées expérimentalement (courant, charges, champs électriques, phénomènes lumineux).

Cependant, comme les décharges en laboratoire risquaient de différer de la foudre naturelle, nous avons procédé à une deuxième expérimentation, où nous déclenchions un coup de foudre naturel : une fusée, semblable à une fusée paragrêle, mais raccordée au sol par un fil partiellement isolant et partiellement conducteur, a été propulsée en altitude vers un nuage orageux. Pour le coup de foudre déclenché, quasi identique aux éclairs naturels, nous avons mesuré les caractéristiques de la phase précurseur : elles correspondaient aux données de la modélisation adaptée aux conditions d'éclair naturel (essai EDF-ONERA-CEA).

Les résultats obtenus ne remettent pas en cause le classique modèle électro-géométrique, mais en fixent les conditions de validité et d'utilisation. Des caractéristiques de l'air, avant la décharge, telles l'humidité locale ou l'altitude du lieu, peuvent être prises en compte. On sait désormais calculer, sur des structures simples (paratonnerres, lignes aériennes), si les conditions d'impact par la foudre sont réunies. L'extension de ces outils à des structures complexes n'est plus... qu'une question de capacité de calcul.

André BONAMY,
Laboratoires de génie électrique, EDF