

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