

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 électrogéométrique» 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.

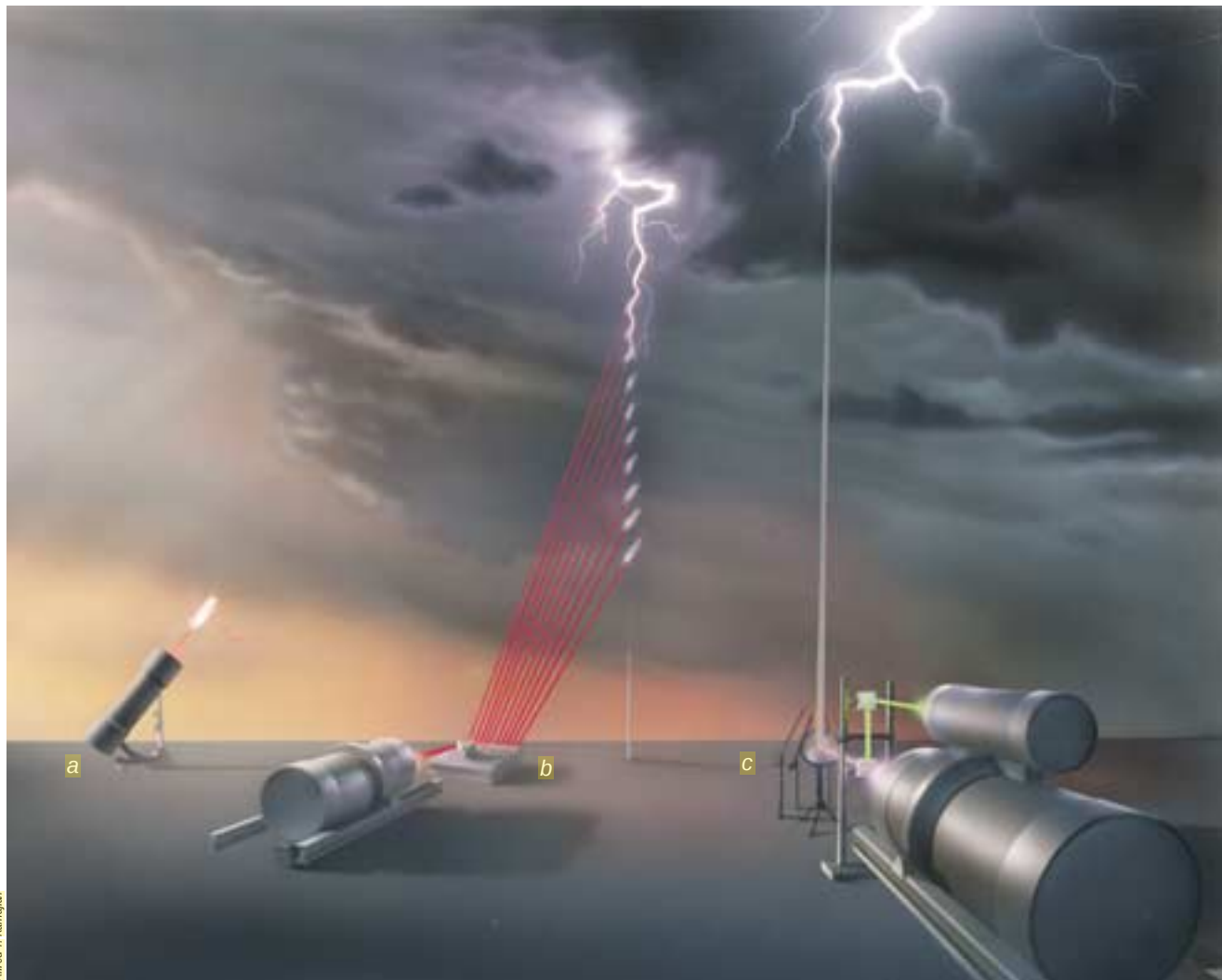
Ces travaux ont été adaptés, dans le cadre d'une collaboration avec *Électricité de France*, aux grandes décharges de plusieurs mètres de longueur, puis à la foudre naturelle. Encore fallait-il valider ces modèles pour des structures soumises à des contraintes réelles.

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 électrogéométrique, 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



Alfred T. Kamajien

6. LES INGÉNIEURS TESTENT DES LASERS pour déclencher la foudre. On pensait que des lasers infrarouges puissants produiraient des canaux conducteurs dans l'atmosphère, mais ces faisceaux ionisent tant l'air, devant eux, que celui-ci devient opaque aux faisceaux et bloque leur propagation (a). Des physiciens japonais expérimentent des faisceaux multiples focalisés par une

série de miroirs pour former un chapelet de poches ionisées qui devraient canaliser la foudre (b). Enfin les auteurs utilisent un laser ultraviolet couplé à un laser visible afin de former un canal ionisé rectiligne que la foudre pourra suivre (c). Des tiges mises à la terre intercepteront l'éclair résultant, protégeant le miroir et l'équipement laser.

priment au cours de leur propagation dans l'atmosphère : la concentration de l'énergie, dans ces impulsions, compense les pertes par diffusion ou par absorption, au cours de la propagation.

Nous n'avons pas encore déclenché d'éclair en plein air, mais l'accord entre les calculs théoriques, les simulations numériques et les expériences de laboratoire à petite échelle nous laisse espérer un succès proche. Nous avons, par exemple, réussi à produire un canal conducteur entre deux électrodes chargées, distantes de 25 centimètres, au moyen de brèves impulsions ultraviolettes : une décharge électrique se produit lorsque la différence de potentiel entre les électrodes est deux fois inférieure à la tension de claquage de l'air normal.

Avec Patrick Rambo, de l'Université du Nouveau-Mexique, nous avons récemment construit un laser ultraviolet 100 fois plus puissant que tous ceux que nous avons testés jusqu'ici. Cet appareil est trop fragile et encombrant pour être transporté jusque dans le centre de

test, mais nous achevons la construction d'un laser ultraviolet portable, qui, couplé à un laser émettant de la lumière visible, devrait produire des décharges longues de plusieurs mètres, en laboratoire. Déclenchera-t-on bientôt le feu du ciel avec celui de la terre ?

Jean-Claude DIELS est professeur d'astronomie à l'Université du Nouveau-Mexique. Ralph BERNSTEIN est chef de projet à l'Institut de recherches sur l'énergie électrique. Karl STAHLKOPF est vice-président de cet institut. Xin Miao ZHAO travaille aux Laboratoires de Los Alamos.

Martin A. UMAN, *All about Lightning*, Dover Publications, 1986.

Xin Miao ZHAO et J.-C. DIELS, *How Lasers Might Control Lightning Strikes*, in *Laser Focus World*, vol. 29, n° 11,

pp. 113-116, novembre 1993.

Xin Miao ZHAO, Jean-Claude DIELS, Cai Yi WANG et Juan M. ELIZONDO, *Femtosecond Ultraviolet Laser Pulse Induced Lightning Discharges in Gases*, in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 31, n° 3, pp. 599-612, mars 1995.

R. BERNSTEIN, R. SAMM, K. CUMMINS, R. PYLE et J. TUEL, *Lightning Detection Network Averts Damage and Speeds Restoration*, in *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 9, n° 2, pp. 12-17, avril 1996.

La foudre au-dessus des nuages

STEPHEN MENDE • DAVIS SENTMAN • EUGENE WESCOTT

Les physiciens observent une curieuse activité électrique au-dessus des nuages, par temps d'orage.

La foudre a toujours intimidé et fasciné. Les Grecs, par exemple, attribuaient la maîtrise de la foudre à Zeus, le roi des dieux. Encore aujourd'hui, on la redoute, parce qu'on ne la maîtrise pas... et qu'on la connaît mal. Ainsi de nombreuses personnes avaient décrit des scintillations bizarres du ciel nocturne : certaines semblaient être des aurores ou des nuages étrangement illuminés, mais d'autres étaient plus mystérieuses ; notamment, des pilotes d'avion avaient observé des éclairs au-dessus des orages. La communauté scientifique méprisait ces comptes rendus jusqu'en 1990, quand John Winckler et ses collègues de l'Université du Minnesota filmèrent un de ces énigmatiques phénomènes à l'aide d'une caméra vidéo : les images révélaient des éclairs d'un type nouveau.

Comment expliquer ces phénomènes électriques de haute altitude ?

Des centaines d'observations, à partir de la navette spatiale, d'avions et du sol ont montré que les effets électriques analogues aux éclairs ne sont pas confinés aux couches de l'atmosphère comprises entre les nuages et le sol : des décharges électriques se produisent régulièrement dans l'air raréfié jusqu'à 90 kilomètres au-dessus des nuages orageux.

Pourquoi ces phénomènes, souvent visibles à l'œil nu, n'ont-ils pas été découverts plus tôt ? Et pourquoi devait-on s'étonner de l'existence d'une forme de foudre très haut dans l'atmosphère ? Les spécialistes de l'atmosphère savent depuis longtemps que, bien au-delà des régions turbulentes de l'atmosphère, les ultraviolets solaires heurtent les molécules de gaz et libèrent quelques électrons : ainsi se crée l'ionosphère, une couche électriquement conductrice autour de

la Terre. Comme des différences de potentiel considérables peuvent s'établir entre les nuages d'orage et l'ionosphère, tout comme entre les nuages et le sol, la foudre peut se déclencher dans ces deux régions, quand l'air, ordinairement isolant, se dissocie et fournit un chemin conducteur que les courants électriques peuvent suivre.

Comme l'atmosphère se raréfie en altitude, les éclairs qui se produisent au-dessus des nuages dissocient moins de molécules d'air que la foudre classique : ils sont généralement rouges et peu visibles. De ce fait, les physiciens doivent utiliser des caméras vidéo sensibles pour les filmer dans la nuit. Malgré ces difficultés, la science des éclairs externes a considérablement progressé, au cours des dernières années.

Deux d'entre nous (D. Sentman et E. Wescott) ont organisé des campagnes de recherche aéroportées, tandis que nous étudions l'activité électrique de haute altitude à partir du sol.

Les événements électriques de la haute atmosphère sont de quatre types. Deux types de foudre d'altitude, nommées farfadets et elfes, sont, malgré leur nom fantasque, des manifestations atmosphériques bien comprises. Les causes des deux autres types, appelés jets bleus et événements gamma, demeurent plus mystérieuses, mais quelques équipes accumulent les observations dans l'espoir de les élucider.

