

Défense du territoire

Nous défendons notre espace, même sur les parkings.

L'automobile intéresse les anthropologues : elle révèle la vraie nature de l'homme. Un individu bien élevé placé au volant d'une automobile se transforme en défenseur acharné de son territoire. D'Artagnan provoquait en duel en souffletant ses adversaires. Aujourd'hui, il suffit de se rabattre devant une autre voiture sur l'autoroute pour défier et offenser un congénère automobiliste. Même à l'arrêt sur un parking de supermarché, haut lieu d'interactions sociales en cette fin de ^{xx}e siècle, nous exprimons des instincts territoriaux, quand bien même l'espace que nous occupons n'a guère de valeur.

Selon Barry Ruback, de l'Université de Pennsylvanie, une place de parking est un territoire du troisième type : nous ne le pos-



sédons que temporairement, le temps de réaliser une activité prédatrice, après laquelle son occupation est inutile. Les territoires du premier type sont les lieux essentiels à notre vie, tels notre logement ou notre bureau. Les territoires du second type sont ceux que nous occupons régulièrement, telle une table d'habitué au restaurant : quand nous y sommes, personne ne vient nous la disputer.

À quelle vitesse le détenteur d'une place de parking abandonne-t-il son droit temporaire de propriété après qu'il a fait

ses achats ? La défense de ce territoire est contre-productive : le prédateur n'a, en principe, rien de plus pressé que d'abandonner le lieu de sa chasse et de rapporter ses proies chez lui. Pourtant, alors que nous mettons 32 secondes en moyenne pour quitter une place, nous ajoutons sept secondes lorsqu'un autre véhicule attend pour s'y installer.

Une partie de cette majoration proviendrait de l'anxiété, qui diminue, nous le savons, les performances dans des tâches où nous devons insérer des objets dans des espaces étroits ou les enlever. Toutefois, une réaction de défense intervient aussi. Elle est clairement révélée par une autre mesure : nous occupons la place douze secondes de plus lorsque le conducteur qui attend de nous remplacer actionne son avertisseur sonore. Toute tentative d'empiètement sur notre liberté provoque une réaction négative.

La civilisation ne supprime pas nos réactions primitives : elle les transforme. Alors, tournons sept fois la main autour de l'avertisseur pendant 12 secondes avant de klaxonner.

Oscillations du Pacifique

Les mécanismes du phénomène El Niño.

Voulez-vous jouer en bourse sur les valeurs des denrées alimentaires ? Alors scrutez les rapports des météorologues qui analysent les courants dans le Pacifique. Dans cette partie du monde, le phénomène nommé El Niño perturbe le climat mondial jusqu'au cœur de l'Afrique : on vient de démontrer que les récoltes de maïs au Zimbabwe sont réduites après les épisodes El Niño les plus marqués.

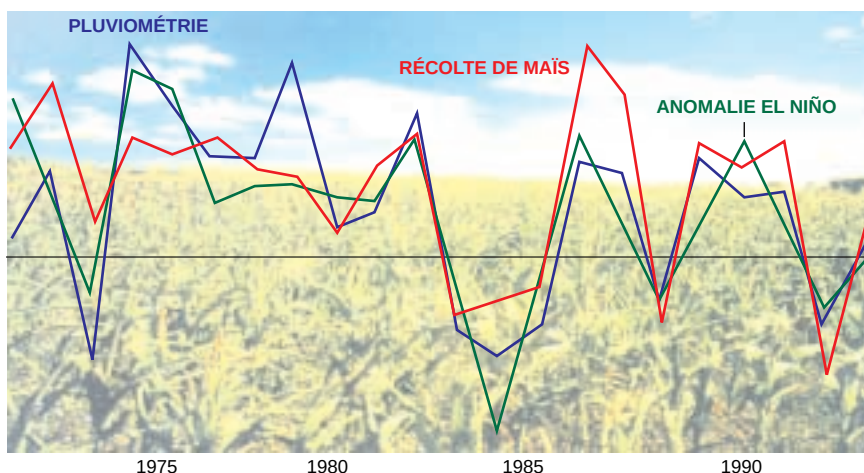
Tous les trois à quatre ans, des pluies diluviennes s'abattent sur les côtes habituellement désertiques du Pérou et de l'Équateur ; les glaciers andins fondent, l'Afrique du Sud et l'Australie souffrent de sécheresse, les tempêtes font rage sur la côte Ouest des États-Unis, de la Polynésie... Comment se déclenchent ces anomalies climatiques récurrentes ? Le mécanisme responsable du phénomène semble être une instabilité des échanges entre l'atmosphère et l'océan, dans le Pacifique central.

On comprenait mal les causes de l'alternance entre des phases de réchauffement, les «épisodes El Niño», et des phases de refroidissement, nommés «épi-

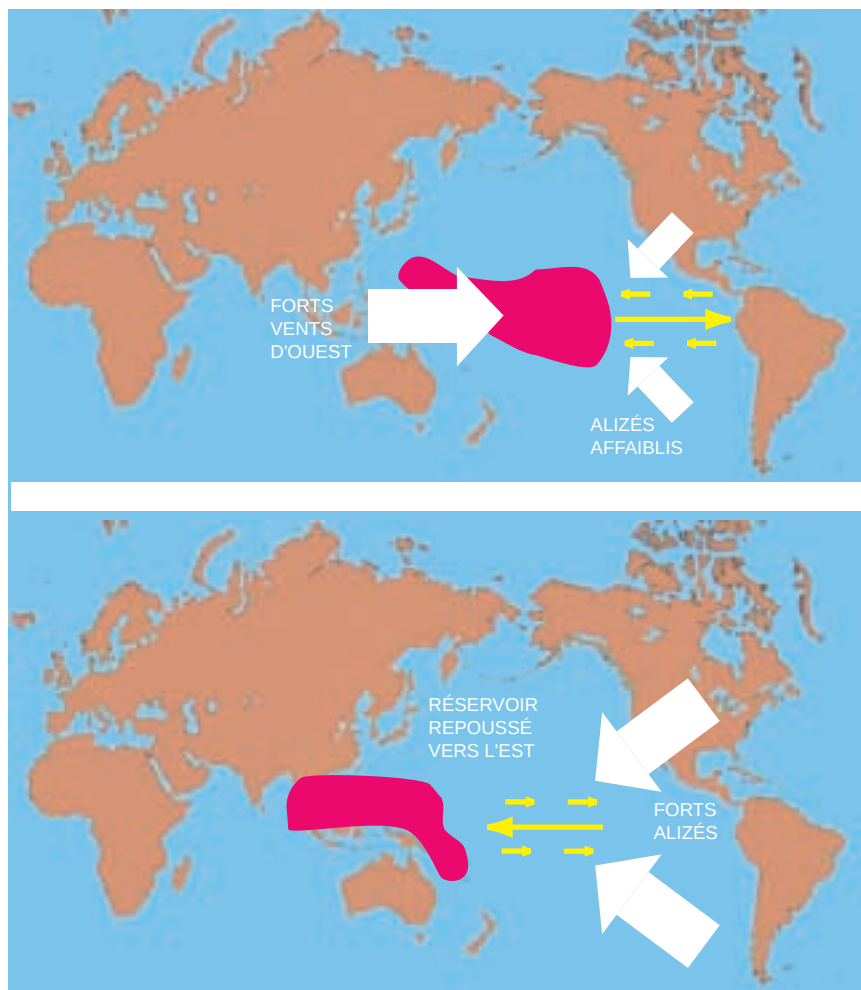
sodes La Niña». On savait que les variations thermiques s'accompagnent d'une oscillation des pressions atmosphériques, entre la Polynésie française et le Nord de l'Australie, ce qui modifie le régime des vents et des courants, le long de l'équateur, mais pourquoi l'immense masse d'eaux chaudes (à une température supérieure à 28,5°C) qui occupe l'Ouest du Pacifique équatorial se déplaçait-elle ?

À partir d'observations du satellite franco-américain *Topex Poseidon* et de mesures atmosphériques et océanographiques effectuées par quelque 70 mouillages répartis dans le Pacifique, Joël Picaut, Yves du Penhoat, Thierry Del-

croix et François Masia, de l'ORSTOM, ont montré que les épisodes El Niño ont lieu quand le bord Ouest du réservoir d'eau chaude se déplace vers l'Est, à la faveur d'un accroissement des vents d'Ouest, dans le Pacifique Ouest, et de l'affaiblissement des alizés dans le Pacifique central. Les phénomènes s'amplifient mutuellement : l'affaiblissement des alizés résulte lui-même du déplacement du réservoir d'eau chaude, parce qu'ainsi la zone principale de convection se décale dans l'atmosphère (l'air chaud monte par convection au-dessus des eaux chaudes), ce qui amplifie les anomalies de vent et les anomalies de courant.



L'intensité du phénomène El Niño (par rapport à la moyenne, en vert) perturbe les précipitations au Zimbabwe (en bleu) ainsi que la production du maïs (en rouge).



Les deux temps forts d'un cycle El Niño : le déplacement d'eaux chaudes vers l'Est bloque la remontée d'eau froide, près du Pérou (*en haut*) ; puis les courants engendrés par ce déplacement rebondissent contre l'Amérique et repoussent les eaux chaudes vers l'Ouest.

Comment l'océan et l'atmosphère sont-ils couplés ? Les vents d'Ouest engendrent des ondes équatoriales qui se propagent vers l'Est à une vitesse de 250 kilomètres par jour : ces ondes sont des ondes d'énergie, comme les vagues ou comme des vibrations à la surface d'un tambour, mais la rotation de la Terre les confine près de l'équateur. Ces ondes ne se déplacent ainsi que dans la direction Ouest-Est ; elles ont une longueur d'onde de plusieurs milliers de kilomètres, et s'accompagnent de courants dans les couches de surface.

Arrivant aux abords des côtes d'Amérique latine, les ondes équatoriales et leurs courants associés bloquent la remontée d'eaux froides profondes, qui refroidit habituellement cette région : le bassin de l'Est du Pacifique se réchauffe ; c'est l'épisode El Niño. Toutefois les ondes équatoriales se réfléchissent sur les côtes, et, avec les courants qui les accompagnent, elles repartent vers le front du réservoir chaud. Elles le repoussent vers l'Ouest, de sorte que les eaux froides remontent à l'Est du bassin Pacifique : c'est la Niña. Puis, quand

cette dernière a recréé les conditions de vent initiales, le phénomène reprend.

Cette description est au cœur d'un programme informatique qui calcule les courants et détermine l'anomalie de vent associée : le résultat est une alternance périodique qui décrit bien le phénomène. Pourquoi, cependant, tous les événements El Niño ne sont-ils pas identiques ? Le programme ne reproduit que des épisodes identiques, car il est volontairement simplifié, mais la prise en compte d'autres phénomènes importants, tels les mouvements verticaux dans l'océan ou les interactions du Pacifique et d'autres régions du Globe, devrait améliorer la théorie. Ces résultats fondamentaux devraient intéresser l'industrie : Michael Wilson a démontré que la consommation de combustibles fossiles dans les installations de chauffage domestique, en Amérique, est réduite quand les épisodes El Niño sont intenses. Comme ces derniers réduisent le nombre d'ouragans dans le golfe du Mexique, la production de gaz naturel est facilitée, de sorte qu'une surproduction menace doublement les sociétés pétrolières.

Des lasers pour déclencher la foudre

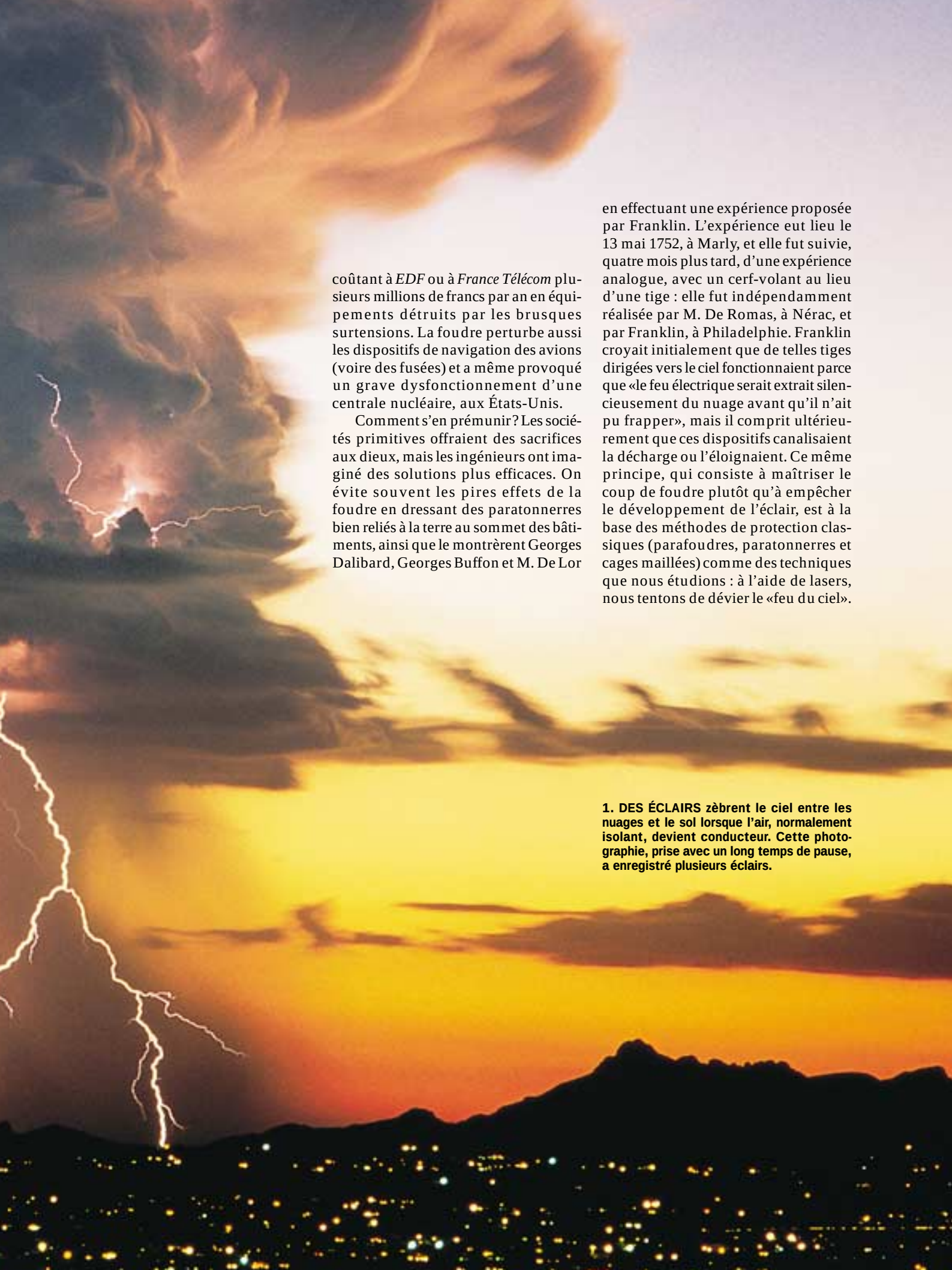
JEAN-CLAUDE DIELS • RALPH BERNSTEIN • KARL STAHLKOPF • XIN MIAO ZHAO

Afin de protéger les équipements industriels, on cherche à dévier les éclairs dangereux à l'aide de lasers.

Malgré plusieurs siècles d'études expérimentales, la foudre demeure un phénomène mystérieux. Depuis Benjamin Franklin, les physiciens savent que des charges électriques peuvent s'accumuler lentement dans les nuages et créer ensuite des éclairs, quand l'énergie emmagasinée est soudainement libérée. Toutefois les

mécanismes exacts du phénomène leur ont échappé longtemps. Quelle est la vitesse de formation des éclairs? Comment se détermine leur trajectoire? Que deviennent les charges électriques dans le sol? L'étude de ces questions laisse entrevoir des moyens pour éviter que la foudre ne frappe des équipements importants.

La foudre est un phénomène naturel aux effets destructeurs : chaque année, en France, elle frappe en moyenne un million de fois, tue des dizaines de personnes et provoque des dégâts matériels considérables, parmi lesquels des incendies de forêts. Elle est responsable d'environ la moitié des coupures de courant dans les régions sujettes aux orages,



coûtant à EDF ou à France Télécom plusieurs millions de francs par an en équipements détruits par les brusques surtensions. La foudre perturbe aussi les dispositifs de navigation des avions (voire des fusées) et a même provoqué un grave dysfonctionnement d'une centrale nucléaire, aux États-Unis.

Comment s'en prémunir? Les sociétés primitives offraient des sacrifices aux dieux, mais les ingénieurs ont imaginé des solutions plus efficaces. On évite souvent les pires effets de la foudre en dressant des paratonnerres bien reliés à la terre au sommet des bâtiments, ainsi que le montrèrent Georges Dalibard, Georges Buffon et M. De Lor

en effectuant une expérience proposée par Franklin. L'expérience eut lieu le 13 mai 1752, à Marly, et elle fut suivie, quatre mois plus tard, d'une expérience analogue, avec un cerf-volant au lieu d'une tige : elle fut indépendamment réalisée par M. De Romas, à Nérac, et par Franklin, à Philadelphie. Franklin croyait initialement que de telles tiges dirigées vers le ciel fonctionnaient parce que «le feu électrique serait extrait silencieusement du nuage avant qu'il n'ait pu frapper», mais il comprit ultérieurement que ces dispositifs canalisaient la décharge ou l'éloignaient. Ce même principe, qui consiste à maîtriser le coup de foudre plutôt qu'à empêcher le développement de l'éclair, est à la base des méthodes de protection classiques (parafoudres, paratonnerres et cages maillées) comme des techniques que nous étudions : à l'aide de lasers, nous tentons de dévier le «feu du ciel».

1. DES ÉCLAIRS zèbrent le ciel entre les nuages et le sol lorsque l'air, normalement isolant, devient conducteur. Cette photographie, prise avec un long temps de pause, a enregistré plusieurs éclairs.

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

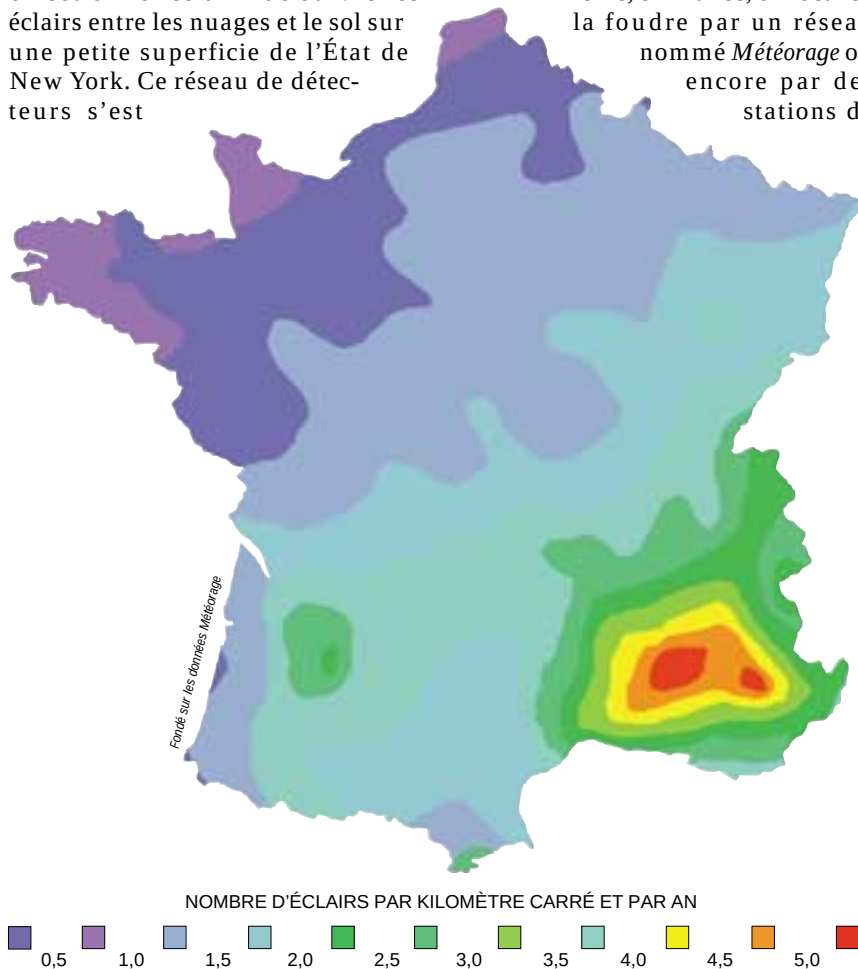
progressivement étendu à d'autres États, au cours des années 1980, de sorte qu'en 1991 ce groupe d'antennes pouvait détecter la chute de la foudre n'importe où aux États-Unis. De même, en France, on localise la foudre par un réseau nommé *Météorage* ou encore par des stations de

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 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 aérospatiales (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.

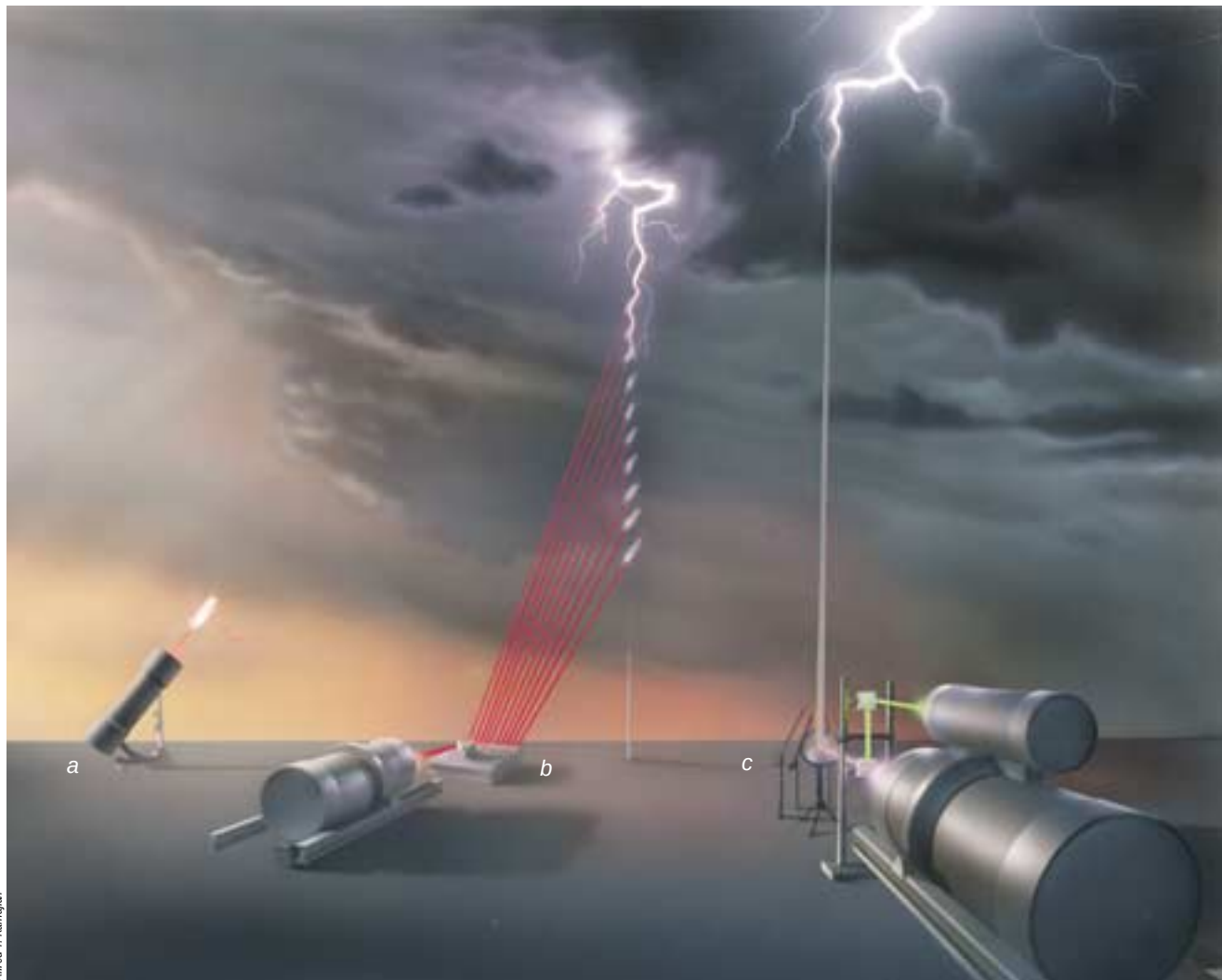
Ces travaux ont été adaptés, dans le cadre d'une collaboration avec *Électricité de France*, aux grandes décharges de plusieurs mètres de longueur, puis à la foudre naturelle. Encore fallait-il valider ces modèles pour des structures soumises à des contraintes réelles.

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



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.

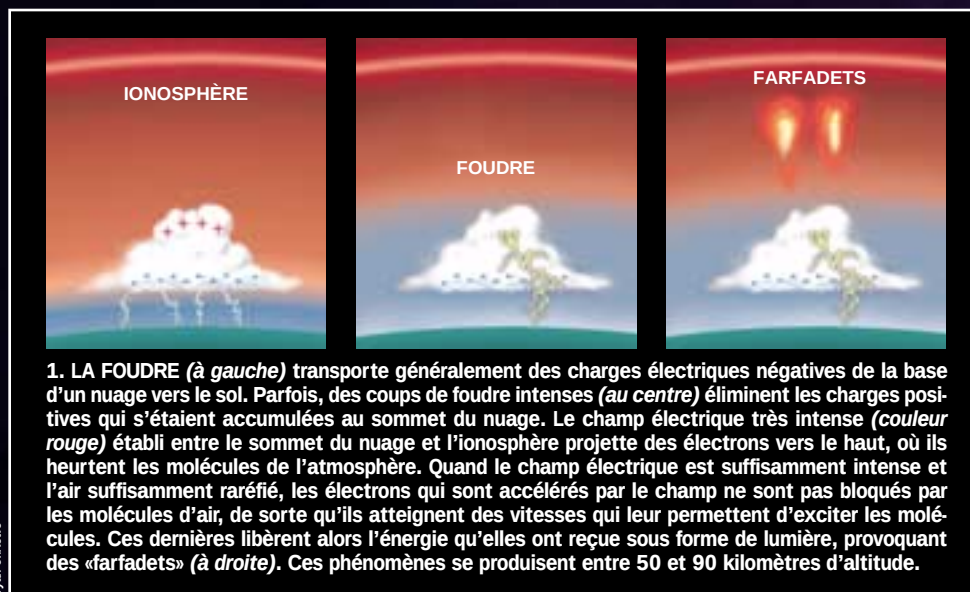
Pourquoi ces phénomènes, souvent visibles à l'œil nu, n'ont-ils pas été découverts plus tôt ? Et pourquoi devait-on s'étonner de l'existence d'une forme de foudre très haut dans l'atmosphère ? Les spécialistes de l'atmosphère savent depuis longtemps que, bien au-delà des régions turbulentes de l'atmosphère,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

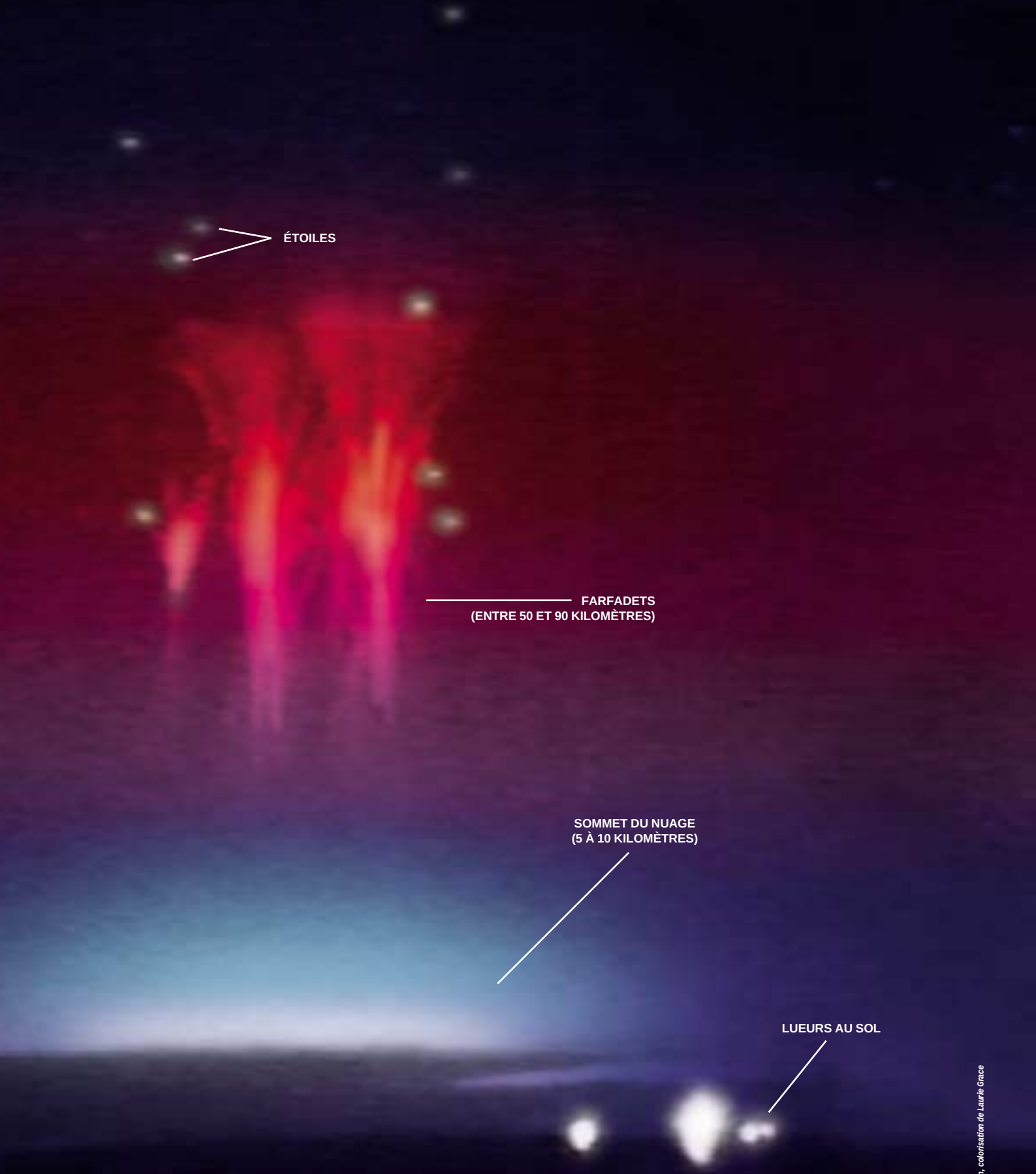
la Terre. Comme des différences de potentiel considérables peuvent s'établir entre les nuages d'orage et l'ionosphère, tout comme entre les nuages et le sol, la foudre peut se déclencher dans ces deux régions, quand l'air, ordinairement isolant, se dissocie et fournit un chemin conducteur que les courants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





ÉTOILES

FARFADETS
(ENTRE 50 ET 90 KILOMÈTRES)

SOMMET DU NUAGE
(5 À 10 KILOMÈTRES)

LUEURS AU SOL

2. LES FARFADETS sont des éclairs lumineux qui se produisent au-dessus des orages, dans une zone de l'atmosphère nommée mésosphère. Seuls certains orages en engendrent. Généralement les parties supérieures des nuages sont chargées positivement, et les parties inférieures négativement. Le plus souvent, la base négative du nuage produit un éclair vers le sol, mais, parfois, la partie supérieure posi-

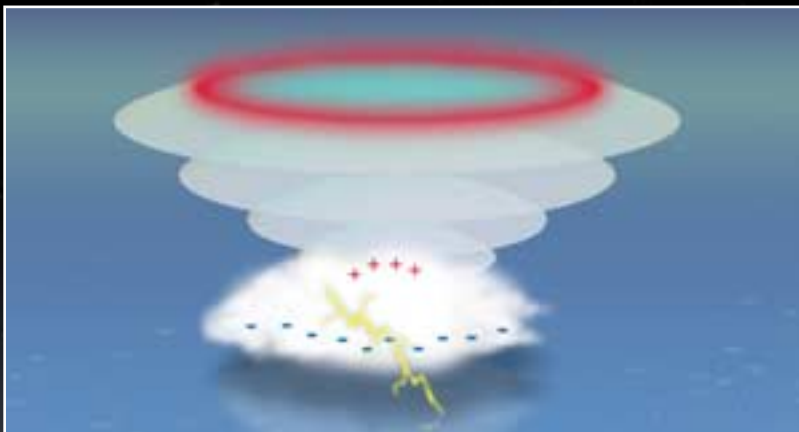
tive peut se décharger directement vers le sol, produisant un éclair d'une intensité exceptionnelle. En moyenne, un de ces coups de foudre sur 20 est assez énergétique pour produire des farfadets. Ces spécimens, filmés du sol par une caméra vidéo noir et blanc, ont été coloriés par ordinateur : ils ont, sur l'image, la même couleur que celle que l'on observe d'avion.



Stephen B. Mende

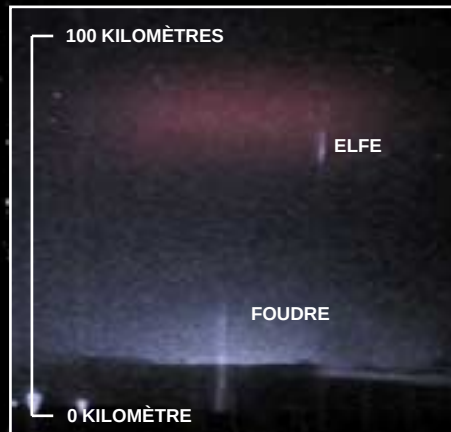
3. LES ELFES, comme les farfadets, sont des manifestations à haute altitude des champs électriques créés par une foudre exceptionnellement intense. Ils se présentent sous la forme de crêpes lumineuses (*ci-dessous*, à droite, on leur a donné la couleur qu'ils ont en réalité). Les elfes peuvent se produire avec les farfadets, mais ils se forment les premiers et subsistent moins longtemps. La série

d'images vidéo (*ci-dessus*) montre l'apparition d'un elfe : juste avant l'éclair, le ciel est uniformément sombre (a). L'éclair illumine le toit nuageux et produit immédiatement la lueur aplatie des elfes dans la mésosphère (b). Peu après, des farfadets jaillissent dans cette partie de l'atmosphère, ajoutant leur éclat à la faible lueur de la couche lumineuse (c). Enfin, seuls les elfes subsistent (d).



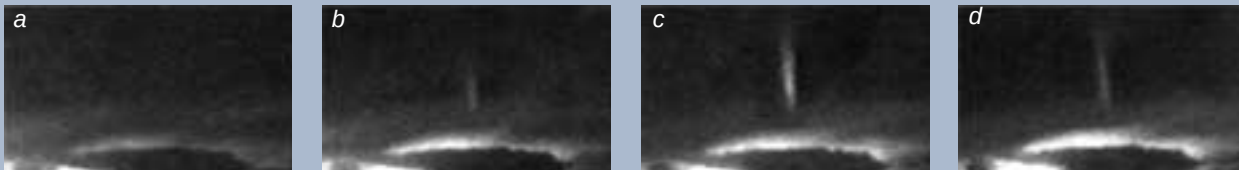
Bryan Christe

4. LES IMPULSIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES associées aux plus gros éclairs engendrent des elfes. Ces impulsions, qui sont des explosions de champ électromagnétique, sont libérées par la foudre à la vitesse de la lumière dans toutes les directions. Quand la partie ascendante de l'impulsion (*calottes sphériques*) atteint une altitude suffisante (75 à 100 kilomètres), le champ électrique accélère les électrons. Ces derniers heurtent des molécules d'air, leur communiquant une énergie qui, lors de la désexcitation, engendre une émission de lumière. Ce mécanisme crée des anneaux lumineux en expansion qui s'élargissent si rapidement qu'ils apparaissent comme des disques aplatis.



Stephen B. Mende

Bryan Christe



5. LES JETS BLEUS, confinés dans la partie inférieure de l'atmosphère, à environ 40 kilomètres d'altitude, sont d'observation difficile. Une image en couleurs (à gauche) montre que la lumière bleu sombre des jets bleus se propage peu dans l'atmosphère, contrairement aux farfadets et aux elfes, qui sont rouges. Pour les observer, on doit s'élever au-dessus des couches inférieures de l'atmosphère. D. Sentman et E. Wescott ont filmé ces cônes de lumière bleue pour la première fois en volant au-dessus d'un très gros orage, dans l'Arkansas, en 1994. Cette suite d'images vidéo (a-d) prises par une caméra monochromatique sensible montre comment les jets bleus sont émis à partir du sommet des nuages d'orage, à des vitesses d'environ 120 kilomètres par seconde. On ignore encore les mécanismes détaillés de leur formation.

6. LES ÉMISSIONS de rayonnements gammas et X, au-dessus des orages, constituent les phénomènes électriques de haute altitude les plus étonnants. Leur existence ne fut découverte que récemment par l'un des instruments de l'Observatoire Compton (à gauche), qui a détecté des rayonnements gamma provenant de la Terre. On savait que les rayonnements gamma étaient produits par diverses sources cosmiques ou par des réactions nucléaires, mais on n'imaginait pas qu'on en trouverait dans l'atmosphère terrestre. Dans les farfadets, par exemple, les électrons atteignent rarement des énergies supérieures à 20 électronvolts (l'énergie qu'un électron gagne quand il est accéléré par une différence de potentiel de 20 volts), alors que les rayonnements gamma correspondent à des énergies atteignant un million d'électronvolts ! L'étude des événements gamma commence seulement.

Stephen MENDE, David SENTMAN et Eugene WESCOTT étudient l'activité électrique de l'atmosphère à l'Université de Fairbanks.

G.J. FISHMAN, P.N. BHAT, R. MALLOZZI, J.M. HORACK, T. KOSHUT, C. KOUVELIOTOU, G.N. PENDLETON, C.A. MEEGAN, R.B. WILSON, W.S. PACIESAS, S.J. GOODMAN et H.J. CHRISTIAN, *Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin*, in *Science*, vol. 264, pp. 1313-1316, 27 mai 1994.

D.D. SENTMAN, E.M. WESCOTT, D.L. OSBORNE, D.L. HAMPTON et M.J. HEAVNER, *Preliminary Results from the Sprites94 Aircraft Campaign*,

1: Red Sprites, in *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n° 10, pp. 1205-1208, 15 mai 1995.

E.M. WESCOTT, D. SENTMAN, D. OSBORNE, D. HAMPTON et M. HEAVNER, *Preliminary Results from the Sprites94 Aircraft Campaign*, *2: Blue Jets*, in *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n° 10, pp. 1209-1212, 15 mai 1995.

H. FUKUNISHI, Y. TAKAHASHI, M. KUBOTA, K. SAKANOI, U.S. INAN et W.A. LYONS, *Elves: Lightning-Induced Transient Luminous Events in the Lower Ionosphere*, in *Geophysical Research Letters*, vol. 23, n° 16, pp. 2157-2160, 1^{er} août 1996.

ADN mitochondrial, maladies et vieillissement

DOUGLAS WALLACE

Des anomalies de l'ADN présent dans des structures nichées au cœur des cellules, nommées mitochondries, sont responsables de diverses maladies et peut-être des pathologies de la vieillesse.



Rob Wood, Wood Ronsaville Harlin, Inc.

À l'âge de cinq ans, un petit garçon qui semblait en bonne santé a commencé à mal entendre, sans raison apparente ; à 18 ans, il était sourd. L'installation de la surdité s'accompagnait d'hyperactivité et de crises d'épilepsie. À 23 ans, sa vue déclina également ; il souffrait de cataracte, de glaucome et, progressivement, sa rétine se détériora. Entre 23 et 28 ans, il eut des convulsions et une atteinte rénale. Il mourut à 28 ans d'une insuffisance rénale et d'une infection généralisée.

À l'origine de tous ces troubles, une infime anomalie génétique, non pas dans l'ADN chromosomique, présent dans le noyau des cellules, mais dans

l'ADN mitochondrial, ces petites boucles d'ADN localisées dans les mitochondries, les centrales énergétiques des cellules. Chacune de ces boucles contient l'information génétique nécessaire à la production des 37 molécules mitochondriales qui fabriquent l'énergie des cellules.

On sait depuis 1963 que les mitochondries contiennent leurs propres gènes, mais la première maladie due à ces gènes n'a été identifiée qu'en 1988. Cette année-là, nous avons découvert l'origine d'une forme de cécité de l'adulte jeune : une atrophie optique familiale, nommée maladie de Leber. Dans plusieurs familles, nous avons

trouvé une petite mutation héréditaire d'un gène mitochondrial. À la même époque, Ian Holt, Anita Harding et John Morgan-Hughes, à Londres, trouvaient que certaines maladies musculaires évolutives résultent d'une anomalie de l'ADN mitochondrial : une délétion (ou absence) d'une partie de cet ADN.

On sait aujourd'hui que des anomalies de l'ADN mitochondrial participent à diverses maladies, dont