

Les mystères de la physique (1)

Comment naît un coup de foudre?

On connaît bien le fonctionnement des éclairs. Pourtant, les scientifiques butent encore sur un détail: quel phénomène commande leur déclenchement? La réponse viendrait de l'espace, nom de Zeus!

Olivier Dessibourg
Ils s'appelaient Seth chez les Egyptiens, Thor dans la mythologie nordique ou encore Zeus sur l'Olympe. Autant de dieux qui, pour ceux qui les vénéraient, domptaient ce feu jaillissant du ciel. Encore associée à une punition au Moyen Age, la foudre a ensuite perdu son

Pour étudier les éclairs sans les attendre, les scientifiques disposent de fusées qui ouvrent la voie à la décharge électrique

coté mystique. Mais pas tous ses mystères. En la titillant en 1752 avec son cerf-volant, Benjamin Franklin a ouvert un nouveau champ de recherches. Or plus de deux cent cinquante ans plus tard, le coup de foudre reste énigmatique. Car les physiciens de l'atmosphère butent toujours sur un détail: quel phénomène commande au déclenche-

ment des éclairs? A leur grande surprise, la réponse pourrait venir de l'espace.
La tête depuis des décennies dans les nuages d'orage que sont les cumulo-nimbus, les chercheurs en ont élaboré une image précise. «Une masse d'air froid s'infiltré sous l'air chaud et le soulève, explique Farhad Rachidi, maître d'enseignement et de recherches à l'EPFL et spécialiste de la foudre. Les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace véhiculés par ces courants verticaux, dont la vitesse peut atteindre 25 m/s, se frottent les uns aux autres. Ce faisant, ils s'arrachent mutuellement des électrons, ce qui induit l'électrisation dipolaire du nuage, comme dans une pile.» La plupart des particules positives sont entraînées vers le haut du nuage, tandis que les charges négatives demeurent dans sa base.
La terre aussi est chargée, négativement par beau temps. Avant l'orage, en revanche, les charges positives s'accumulent à sa surface, attirées par la «borne» négative que constitue la base du cumulo-nimbus. Un champ électrique de dizaines de milliers de volts par mètre

(V/m) s'établit alors entre ces deux entités. Et tout est prêt pour les éclairs.
Nombre d'entre eux ont lieu entre nuages. Ceux qui touchent le sol sont de différents types, avec toutefois une large prédominance des éclairs dits «descendants négatifs». Dans ce cas, une prédécharge intervient à l'intérieur du nuage. Ce déclic déclenche une avalanche: des électrons, accélérés par le champ électrique induit par le déséquilibre de charges dans le nuage, viennent frapper les molécules d'air et d'eau, pour leur arracher d'autres électrons, qui font de même avec les molécules voisines, et ainsi de suite. Naît alors ce que les scientifiques nomment le «traceur par pas», sorte de canal rempli d'électrons. Son rôle: ouvrir le chemin à la foudre. Ainsi, cette avalanche d'électrons fend l'air en le ionisant, c'est-à-dire en le chargeant. Elle progresse en zigzag et par bonds successifs de 50 à 100 mètres, séparés par un temps d'arrêt de quelque 50 microsecondes. Et cela jusqu'à ce quelle rencontre un autre traceur, descendant, issu d'une aspérité du sol.

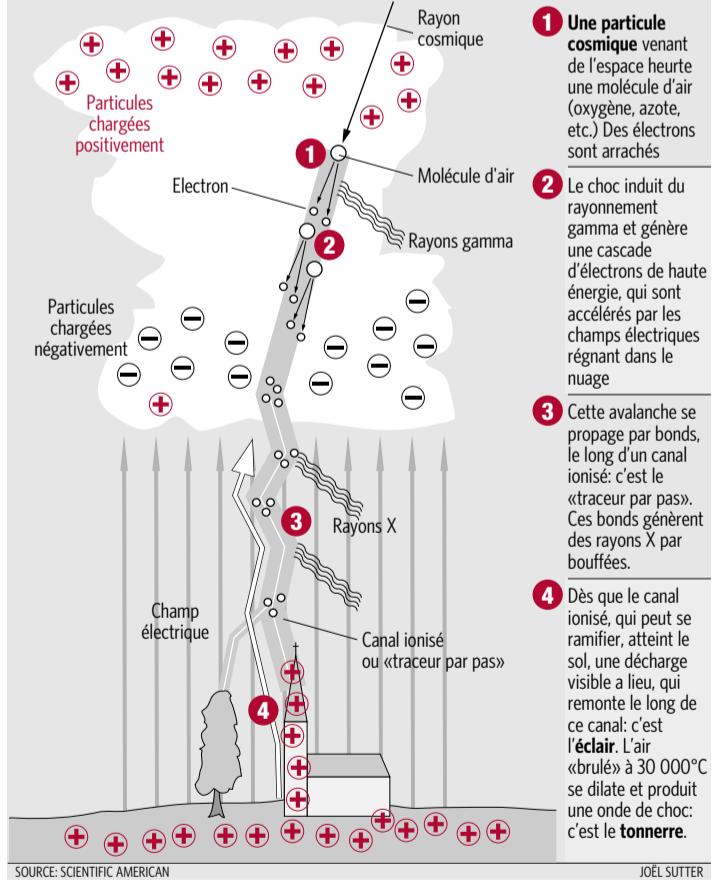


décennies de mesures au cœur même des nuages d'orage à l'aide de ballons-sondes, de fusées ou d'avions, jamais de telles valeurs n'ont pu être répertoriées.
Peut-être existe-t-il des zones de champs électriques locaux très puissants, ont avancé certains scientifiques. «Cette explication n'est pas satisfaisante, estime Farhad Rachidi, car on remplace une question par une autre. En effet, comment ces zones se créeraient-elles?» De plus, aucune mesure n'a apporté le moindre début de confirmation.

supposent les physiciens depuis peu. Ce sont des particules subatomiques de très haute énergie, invisibles, issues notamment de l'explosion de supernovae, qui lézardent tout l'espace intergalactique et bombardent la Terre en permanence. En heurtant les molécules de l'atmosphère (oxygène, azote, etc.), ces rayons leur arrachent des électrons, auxquels ils transfèrent leur fantastique énergie. Ces électrons lanceraient alors l'avalanche du traceur par pas.

d'énormes quantités de rayons X, dont l'énergie atteint 250 000 électronvolts (eV), soit le double de la dose typique utilisée en radiographie. Les chercheurs américains ont aussi eu la chance de faire des mesures sur des éclairs naturels. Les rayons X constitueraient donc bien la signature de ces cascades d'électrons rapides, et donc du rôle générateur des rayons cosmiques.
Pourtant, le tableau n'est pas encore complet. Il reste un détail – et non des moindres – à élucider: si ces cascades d'électrons sont déclenchées par les rayons cosmiques, quelle doit être l'énergie de ces derniers? En 2003, Gurevitch l'a estimé à 10¹⁶ eV. Et là, dilemme: des rayons cosmiques si énergétiques frappent chaque kilomètre carré de la Terre toutes les 50 secondes seulement. Une fréquence insuffisante pour expliquer la centaine d'éclairs qui zèbrent le ciel chaque seconde sur la planète. Toutefois, des bouffées de rayonnement extrême – des rayons gamma cette fois, et non plus X – créées par le passage de ces particules cosmiques ont bel et bien été détectées, notamment par la satellite Rhesi. Entre ces deux observations, quelle vérité choisir? Il y a donc encore un hic dans la séduisante théorie.

L'origine possible de la foudre: les rayons cosmiques



Aberration de la physique
Dès lors, la voie est libre; une immense décharge, bien visible celle-là, a lieu le long de ce canal ionisé. C'est l'éclair, ou «arc en retour», qui se déplace à partir du sol à environ 100 000 km/s. L'air est subitement chauffé à 30 000 °C. Comme l'explique l'expert de la foudre Claude Gary*, «cette élévation de la température provoque une violente dilatation du canal d'air, si bien que [...] le cœur du canal explose». Cette onde de choc, c'est le tonnerre. «Et s'il reste des charges dans le nuage ou à terre, d'autres arcs en retour ont lieu, qui suivent le même chemin. D'où l'impression visuelle, parfois, que l'éclair clignote», ajoute Farhad Rachidi.
Pour des questions de sécurité, les paramètres électromagnétiques de la foudre ont déjà été abondamment étudiés. Notamment dans les années 1960 par un groupe pionnier de l'EPFZ au Monte San Salvatore, au Tessin. Or tous les chercheurs sont vite tombés sur un os: l'air étant un bon isolant, le champ électrique reliant le cumulo-nimbus à la terre est théoriquement trop faible pour permettre une quelconque décharge, donc des éclairs. Selon les simulations, ce champ devrait être dix fois plus important, de l'ordre de 1 à 3 millions de V/m. Mais malgré des

Bombardé de neutrinos
Selon une autre théorie, il pourrait se former, dans les nuages, des gouttes ellipsoïdes de glace, appelées hydrométéores. La présence de ces gouttes allongées augmenterait localement drastiquement la valeur du champ électrique par le biais d'un «effet de pointe» – le même que sur un clocher d'église. «Lorsqu'il y a suffisamment de grosses gouttes, cela forme une chaîne ionisée, relate Claude Gary. Cette chaîne va vite se développer de proche en proche et se transformer en traceur.» Récemment, des expériences ont bien montré un petit effet de pointe sur des gouttes isolées, mais sans que celles-ci n'induisent un champ électrique suffisant. Quant à la chaîne évoquée, les chercheurs ont bien essayé de la reproduire, mais en vain.
En 1992, le problème est reformulé par un scientifique russe, Alexander Gurevitch. Selon lui, il suffirait que les électrons de cette cascade de ionisation aient une très grande énergie. Pourquoi? Explication de Farhad Rachidi, en puisant dans les particularités de la physique: «Lorsqu'ils ont une faible énergie, les électrons sont freinés par les molécules d'air qu'ils heurtent. Et ils subissent d'autant plus de résistance que leur vitesse est grande, comme lorsque l'on sort la main par la fenêtre en voiture. Mais à partir d'une certaine vitesse – 6000 km/sec. –, le comportement s'inverse: plus la vitesse est importante, plus la force de friction est faible. Les électrons peuvent alors être accélérés jusqu'à des vitesses proches de celles de la lumière.» Avec quel avantage? «Dans un tel mécanisme, le champ électrique nécessaire à la ionisation de l'air, puis à l'éclair, peut être jusqu'à 10 fois moindre. Ce modèle «collerait» donc avec les observations.»

L'affaire n'est pas simple
La théorie posée, il reste à la mettre à l'épreuve. Des pistes existent. Les chercheurs savent que ces cascades d'électrons de hautes énergies génèrent des rayons X ou gamma sur leur passage. «Pour tester ce modèle, on doit donc traquer les rayons X», résume Joseph Dwyer, du Florida Institute of Technology, l'un des experts mondiaux du domaine. Mais l'affaire n'est pas simple: «Les rayons X sont absorbés par l'atmosphère sur des distances de quelques centaines de mètres de la source. De plus, les orages sont des environnements électromagnétiques «bruyants». Les signaux sont donc aussi difficiles à isoler du bruit de fond d'un orage qu'une conversation dans le brouhaha d'un restaurant noir de monde.»
En 2001 pourtant, des chercheurs américains annoncent avoir observé un rayonnement de haute intensité, probablement des rayons X, lors de plusieurs impacts de foudre au sommet d'une montagne. Le lien direct entre foudre et rayons X semble être établi. Malgré tout, l'observation doit être confirmée, voire reproduite. Pour ce faire, les scientifiques n'attendent pas les trop aléatoires coups de foudre. Ils ont mieux: un système permettant de déclencher artificiellement les éclairs, mis au point dans les années 1970 déjà.

Hic dans la théorie
«Il s'agit d'une petite fusée en plastique, lancée sous un nuage d'orage, qui déroule derrière elle un fil de kevlar, explique Farhad Rachidi, habitué de l'engin. Ce filin conducteur remplace la dernière portion d'un traceur d'éclair qui se forme entre le nuage et la terre.» Et en se déclenchant, l'arc en retour le consomme complètement. «De tels éclairs sont très intéressants, détaille Jo Dwyer, car on peut contrôler le lieu et le moment précis du déclenchement du phénomène.» Résultat: les coups de foudre provoqués produisent effectivement

La foudre en boule: hallucination, illusion d'optique ou réalité?

Le capitaine Haddock en perd son binocle, Tournesol son chapeau, et Milou défile. Dans l'album de Tintin «Les Sept Boules de cristal», une boule de feu surgit de la cheminée et tourne dans la pièce. Hallucination d'Hergé ou phénomène réel? Des centaines de personnes auraient vu la «foudre en boule». Il en existerait aussi quelques clichés. Mais les scientifiques sont désarmés lorsqu'il s'agit d'expliquer comment se forme cette sphère blanche ou jaune et très brillante, d'un diamètre de 5 à 40 cm, qui pourrait persister jusqu'à des dizaines de secondes, se dépla-



çant aléatoirement et flottant sur le sol, avant de s'évanouir ou d'exploser. Selon une théorie, lorsque frappe la foudre, elle vaporiserait des particules de silice et de carbone contenues dans le sol. Celles-ci constitueraient alors de minuscules perles de silicium pur qui, reliées en chaînes, formeraient une sorte de «bulle» remplie d'air brûlant. Ce «ballon» pourrait se faufiler par la cheminée, une fenêtre entrouverte ou un trou de serrure, et se déplacerait comme une montgolfière, le temps que le silicium se consume en brillant comme une ampoule de 100 Watts. Pour l'heure, aucune expérience en laboratoire n'est toutefois parvenue à reproduire le phénomène.
O. D.

* «La Foudre», C. Gary, Ed. Dunod.
** Scientific American, mai 2005.

Demain: Sur les traces de la masse