



# COUP DE Foudre

**C**oup de tonnerre! Enfin, on a vu de quoi étaient faits la collèère de Zeus et le marteau de Thor. «*C'est un peu un conte de fées*», s'étonne encore le chasseur d'éclairs Brian Hare, à l'université de Groningue, aux Pays-Bas. Avec son happy end: l'origine des éclairs, une des plus grandes énigmes de la physique, trouve enfin une explication solidement ancrée dans la science. «*Quand je suis arrivé en Hollande, poursuit-il, je ne pensais pas que l'on y parviendrait.*» Le physicien de l'atmosphère se retrouvait certes devant un remarquable instrument pour observer le ciel... «*mais [il] n'éta[i]t pas certain que ce radiotélescope puisse passer de l'Univers à celle des nuages*». Ce télescope capable d'un si grand écart, c'est le LOFAR, acronyme anglais pour Low Frequency ARray,

Comment naît un éclair? Qu'est-ce qui déclenche ce phénomène spectaculaire et fantasmagique? Grâce à un supertélescope braqué sur un cumulonimbus orageux, les physiciens ont pour la première fois réussi à identifier son fugace signal précurseur... Ça y est: on sait enfin d'où vient la foudre.

PAR JEAN-BAPTISTE VEYRIERAS

# LA FIN DU MYSTÈRE !

littéralement « grille à basse fréquence », le plus puissant actuellement en service dans le monde. Il capte les ondes radio, dont la fréquence est des dizaines de milliers de fois plus faible que celle de la lumière visible. Et il est si puissant qu'il peut aussi bien cartographier des explosions d'étoiles massives situées à des millions d'années-lumière que de fines décharges électriques au sein des nuages situés juste au-dessus de ses antennes, « *et ce en 3D et au mètre près!* », exulte le doctorant Christopher Strepka, qui a travaillé d'arrache-pied au côté de Brian Hare à l'amélioration des algorithmes de traitement de ces signaux.

## REVOIR LES MANUELS DE CLASSE

Le LOFAR ouvre ainsi une fenêtre inédite sur les cumulonimbus les plus noirs et les plus chaotiques, ceux qu'aucune caméra, aucun avion, aucun aventureux ballon scientifique en quête d'éclairs n'aurait pu pénétrer: « *Les nuages sont transparents aux radiofréquences* », rappelle le physicien des

orages Paul Krehbiel, de l'université de l'Utah. Estimant que le secret de la foudre se cache derrière le voile opaque des gouttes d'eau et des cristaux de glace, il a été l'un des pionniers, avec le chercheur français Pierre Laroche, de l'auscultation des nuages à l'aide d'antennes radio. « *Nous avions commencé dès les années 1980* », rappelle-t-il. Mais à l'époque, le matériel avait encore du mal à être aussi rapide que l'éclair... Quarante ans plus tard, le LOFAR peut suivre à la trace, microseconde par microseconde, la propagation de la foudre. Mieux encore: il peut en capturer les prémices! Et nos manuels de classe vont devoir subir quelques révisions.

Car l'explication généralement donnée sur l'origine des éclairs ne colle pas avec la réalité. Certes, les frottements entre les minuscules particules de glace brassées par les vents à l'intérieur de l'orage – un peu comme lorsqu'on frotte une règle contre un pull – conduisent bien à polariser le nuage: les particules les plus lourdes, chargées négativement, s'accumulent à sa base, et les particules les plus →



# LE SECRET ?

légères, chargées positivement, ont tendance à être piégées au sommet par les courants ascendants... «*Mais le champ électrique qui en résulte est trop faible pour engendrer spontanément des éclairs*», rappelle Paul Krehbiel. Toutes les mesures à l'intérieur des nuages indiquent en effet une valeur plus de dix fois inférieure à la valeur minimale pour faire craquer l'air et ouvrir un chemin au courant électrique – autrement dit à une avalanche d'électrons arrachés aux molécules d'oxygène et d'azote de l'air. Pour naître, les éclairs ont donc forcément besoin d'un supplément d'âme, d'un autre phénomène en mesure d'amplifier, ne serait-ce que localement, ce champ électrique, et de venir à bout de la résistance de l'air... «*Et c'est ce que nous avons observé!*», s'exclame Brian Hare. Le signal a été capté au cœur de l'été 2018, presque pile au-dessus du centre névralgique du LOFAR. Il est apparu quelques microsecondes avant que jaillisse,

précisément au même endroit, un éclair. Têtu, il a nécessité un long et minutieux traitement algorithmique jusqu'à ce que finalement, sous les yeux ébahis des scientifiques, prenne forme le secret du coup de foudre : un rayonnement radio de quelques dizaines de mégahertz qui naît à la base du nuage, puis s'amplifie de manière exponentielle à mesure qu'il se propage vers le haut, sur près de 90 mètres.

## UN SUPPLÉMENT D'ÂME

«*Il s'agit d'une décharge précurseur*», interprète Christopher Sterpka. «*Un craquement rapide positif au sein du nuage*», ajoute Paul Krehbiel. Car, à la différence de la foudre, ce sont ici des charges positives qui remontent dans le nuage en s'éparpillant sous la forme d'une myriade de filaments, formant un plasma froid, beaucoup moins chaud et rayonnant que celui qui irrigue les branches d'un véritable éclair. Sauf qu'à mesure que ces filaments progressent, ils intensifient localement le champ électrique : le voilà, le supplément d'âme nécessaire à l'apparition d'un éclair!

À la base du nuage, juste avant qu'éclate la foudre, une myriade de filaments de plasma froid remontent jusqu'au sommet en quelques microsecondes : des anti-éclairs. C'est la décharge précurseur. Elle se nourrit des molécules de l'air privées de leurs particules négatives, accélérant les ions positifs jusqu'à des milliers de kilomètres/seconde. Et concentre les charges négatives au point de naissance de ces anti-éclairs. Jusqu'à déclencher la foudre.

# UNE FORÊT D'ANTI-ÉCLAIRS SE FORME DANS LE NUAGE

Il y a quelques années, les physiciens auraient sûrement peiné à donner du sens à un tel signal radio – il aurait peut-être rejoint l'étagère encombrée des signaux lumineux exotiques générés par les orages... Mais les modélisations, en laboratoire et par ordinateur de la propagation des décharges électriques dans l'air, avaient prédit depuis quelques années déjà l'existence de ce phénomène. De premières observations au radiotélescope commençaient même à le montrer à l'œuvre dans la nature, en particulier celles de Paul Krehbiel, publiées en 2016, à l'aide d'une autre grille d'antennes déployées au Nouveau-Mexique. Là, avec la précision des 114 antennes du LOFAR, il n'y a plus de doute. C'est bien cette forêt de frères éclairs invisibles à l'œil nu qui amplifie la densité des charges négatives à sa base et déclenche au final la foudre.

## LA PISTE DU RAYON COSMIQUE

Reste maintenant à éclaircir les détails. À traquer les phénomènes microscopiques des microparticules de glace et des électrons qui initient ces anti-éclairs. Comment apparaissent-ils ? Pourquoi certains donnent-ils naissance à des éclairs et d'autres non ? Ute Ebert, qui dirige à l'université technique d'Eindhoven l'un des laboratoires les plus avancés en matière de simulation de ces décharges initiatrices d'éclairs, y travaille en collaboration étroite avec Brian

Hare et l'équipe du LOFAR. « Nous allons tenter d'améliorer encore la résolution du télescope », annonce Christopher Sterpka. « Il faut à présent combler le fossé entre ces observations macroscopiques dans les nuages et celles faites à l'échelle microscopique en laboratoire », renchérit Ute Ebert. La grande quête de l'origine des éclairs s'est déplacée vers celle des anti-éclairs. Pour l'heure, deux hypothèses se dégagent sur l'origine des électrons libres qui apportent l'énergie nécessaire pour les créer, « deux hypothèses qui pourraient se révéler complémentaires », suggère même la chercheuse. Ce pourrait tout simplement être les particules de glace du nuage qui, grâce à leur charge électrique, arracheraient des électrons aux molécules voisines et les accéléreraient. Ou des électrons libres venus de l'espace qui s'insinueraient dans le nuage ! Eh oui, la Terre est en permanence bombardée de rayons cosmiques. Et les physiciens de l'atmosphère savent bien qu'ils provoquent des cascades de particules, dont des électrons très énergétiques – qui se déplacent si vite que, rassemblés sous forme de gaz, leur température grimperait jusqu'à 11 000 °C !

« Je suis persuadé que d'ici quelques années nous aurons toutes ces réponses », conclut Paul Krehbiel. La puissance de Zeus et de Thor n'aura alors plus aucun secret pour les humains.

## NOS SOURCES

Christopher Sterpka et al., *Geophys. Res. Lett.* (2021); Xiaoran Li et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* (2021); Sander Nijdam et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* (2020); William Rison et al., *Nat. Commun.* (2016). Retrouvez toutes nos sources sur [epsilonon.com/](http://epsilonon.com/) sources. Toutes les citations sont extraites d'interviews réalisées par Epsilonon.