

D'autres phénomènes lumineux ont été observés à diverses altitudes. Les elfes sont des disques lumineux qui s'étendent horizontalement sur plusieurs centaines de kilomètres à des altitudes de l'ordre de 90 kilomètres et à une vitesse proche de celle de la lumière. Plus nombreux que les sylphes, les elfes apparaissent après tous les types d'éclairs. Ils éclairent moins d'une milliseconde.

Les jets bleus surgissent au sommet des nuages sous la forme de cônes étroits durant environ 100 millisecondes. La plupart s'arrêtent à 40 kilomètres d'altitude environ, mais certains jets, dits géants, forment une connexion électrique directe entre le nuage de l'orage et la base de l'ionosphère.

Une ionisation locale de l'ionosphère

Toutes ces émissions n'agissent pas de la même façon sur l'atmosphère, ce qui renseigne sur leurs propriétés énergétiques : les filaments des sylphes et les jets géants échauffent, voire ionisent l'atmosphère qu'ils traversent, les elfes ionisent, la base de l'ionosphère lors de leur formation, tandis que les halos restent sans effet. Ces derniers sont donc des émissions lumineuses moins énergétiques.

Les sylphes, les jets et les elfes sont les structures les plus fréquemment observées – et les plus faciles à voir, car elles sont suffisamment éloignées des nuages orageux pour ne pas être masquées par la lumière des éclairs. Des systèmes semi-automatiques peuvent ainsi en enregistrer à plusieurs centaines de kilomètres à l'horizon. Toutefois, il existe aussi d'autres émissions de plus petite taille dans la partie inférieure des filaments des sylphes et au sommet des nuages. Nommées gnomes, trolls ou lutins, ces émissions ne peuvent faire l'objet d'une observation systématique du fait de leur proximité des orages.

En analysant les caractéristiques des différentes émissions (altitude, durée, spectre, forme, etc.), diverses équipes, dont la nôtre, commencent à élucider certains mécanismes intervenant dans leur formation. Les elfes font partie des phénomènes les mieux compris. Ils se produisent après tous les éclairs dépassant un certain seuil énergétique. Ces éclairs engendrent une impulsion électromagnétique très intense qui se propage jusqu'à l'ionosphère et chauffe les électrons ambiants de l'ionosphère inférieure. Accélérés par ce



2. UN JET GÉANT observé lors d'un orage sur l'île de La Réunion.

chauffage, les électrons acquièrent une énergie cinétique suffisante pour interagir avec les molécules de l'air, ce qui produit une émission lumineuse et une ionisation locale de l'atmosphère : chaque molécule d'air ionisée produit un ou deux électrons, qui ionisent à leur tour les molécules d'air voisines, etc. Cette ionisation locale de l'atmosphère persiste pendant plusieurs dizaines de secondes.

La forme des elfes – un disque de lumière qui s'élargit – est sans doute due au fait que, les molécules d'air se raréfiant dans les couches supérieures de l'ionosphère, les réactions de proche en proche entre les électrons et les molécules de l'air restent principalement cantonnées dans la couche inférieure de l'ionosphère.

Les jets s'expliquent seulement par la présence des champs électrostatiques de l'orage. Les jets géants peuvent être comparés à des décharges reliant directement le nuage et l'ionosphère au lieu du sol comme on le voit pour un éclair classique.

Les sylphes, quant à eux, ne se produisent qu'après les éclairs positifs. Ces éclairs

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Tavani *et al.*, Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 018501, 2011.

E. Blanc, Space observations of transient luminous events and associated emissions in the upper atmosphere above thunderstorm areas, *C. R. Geoscience*, vol. 342, pp. 312-322, 2010.

T. Neubert *et al.*, Recent results from studies of electric discharges in the mesosphere, *Surv. Geophys.*, vol. 29, pp. 71-137, 2008.

J. Dwyer, Les éclairs radiographiés, *Pour la Science*, n° 332, pp. 80-87, 2005.

apparaissent à la fin de gros orages : partant de la région supérieure du nuage, chargée positivement, des particules positives sont attirées par une région du sol chargée négativement. Après un éclair positif, des charges négatives persistent dans le nuage. Ces charges produisent un champ électrique transitoire à des altitudes supérieures à celle du nuage. Ce champ électrique pourrait être responsable de l'apparition des halos, la partie supérieure des sylphes. Voyons comment.

Lorsque le champ électrique des orages pénètre dans les couches supérieures de l'atmosphère, il diminue avec l'altitude, mais moins vite que le seuil de claquage de l'air. Ainsi, à une certaine altitude (environ 70 kilomètres) qui dépend de divers facteurs, notamment l'humidité de l'air, le champ électrique engendré par l'orage dépasse le seuil de claquage de l'air. L'air à cette altitude devient conducteur, et le champ électrique de l'orage y produit des courants qui l'échauffent – des décharges –, entraînant des émissions lumineuses. Pour la majorité des sylphes, on a ainsi mesuré des variations du moment de charge (une grandeur qui rend compte à la fois de la charge neutralisée dans le nuage et de la hauteur de la décharge) supérieures à 300 coulombs · kilomètres, que l'on ne rencontre que pour les éclairs les plus puis-

sants. Ces courants confirment que la formation des sylphes est liée à des modifications importantes de la conductivité dans l'atmosphère moyenne et supérieure.

Les sylphes sont souvent observés plusieurs dizaines de millisecondes après l'éclair positif, car il s'effectue souvent un transfert de charges sur des distances importantes à l'intérieur du nuage. Les sylphes sont ainsi la plupart du temps décalés latéralement de plusieurs kilomètres de l'éclair positif qui les a déclenchés.

Une avalanche d'électrons ?

Dès les années 1920, le physicien écossais et prix Nobel Charles Wilson avait prédit que les électrons pouvaient être suffisamment accélérés au-dessus des orages pour dépasser le seuil de claquage de l'air et provoquer de tels phénomènes. Toutefois, aux altitudes inférieures à 70 kilomètres, notamment aux altitudes des nuages (4-15 kilomètres), c'est loin d'être le cas. Les champs électriques ne sont pas suffisants pour atteindre le seuil de claquage conventionnel. Par exemple, les champs électriques mesurés par ballon dans les nuages par Robert Marshall, de l'Université Stanford aux États-Unis, atteignent 100 à 200 kilovolts par mètre alors que le seuil de claquage conventionnel dépasse un

mégavolt par mètre à l'altitude des nuages. Comment, alors, expliquer la partie inférieure des sylphes ?

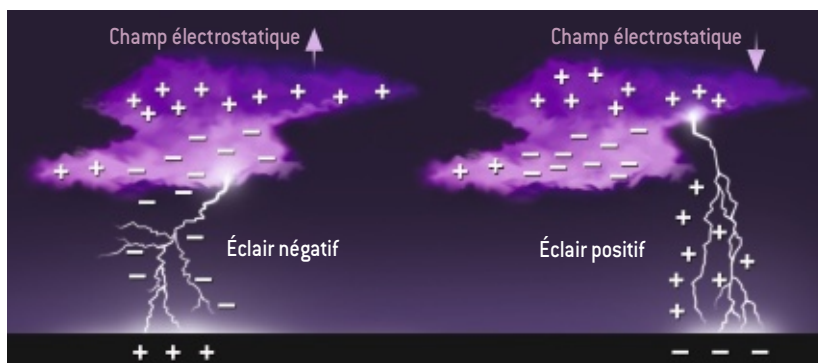
En 1996, Robert Roussel-Dupré, du Laboratoire de Los Alamos, aux États-Unis, et Alexander Gurevich, de l'Institut de physique de Moscou, ont proposé d'expliquer ces phénomènes par une avalanche d'électrons dits relativistes, c'est-à-dire très énergétiques. Au-dessus d'un seuil de l'ordre de 100 kiloélectronvolts, les électrons gagnent plus d'énergie *via* le champ électrique des orages qu'ils n'en perdent par interaction avec l'air. Ces électrons sont alors accélérés vers le haut par le champ électrique intense de l'orage. Ils arrachent des électrons aux molécules d'air, qui eux-mêmes sont accélérés, entrent en interaction avec d'autres molécules d'air et produisent une avalanche d'électrons de haute énergie.

Pour provoquer la formation de décharges, ce mécanisme nécessite un champ électrique dix fois moins intense que le seuil de claquage de l'air sec – une valeur compatible avec celle des champs mesurés lors des orages – à condition que des électrons atteignent des énergies suffisantes pour déclencher l'avalanche ! En fait, un seul électron de haute énergie est suffisant pour amorcer ce mécanisme. Un tel électron pourrait être produit par la collision d'un rayon cosmique avec les molécules de l'air. Ces particules de haute énergie, provenant

ÉCLAIRS NÉGATIFS ET ÉCLAIRS POSITIFS

Lors d'un orage, les nuages ont généralement une structure électrique tripolaire avec des charges négatives au milieu du nuage et des charges positives dans leurs parties supérieure et inférieure, mais à faible densité (des hydrométéores positifs légers, tels les cristaux de glace, montent plus haut dans le nuage que d'autres plus lourds et négatifs). Le sol au-dessous du nuage se charge positivement. Des décharges au sein du nuage – des circulations rapides de charges électriques créant un courant – amorcent les éclairs nuage-sol (elles-mêmes pourraient être déclenchées par les rayons cosmiques). Guidées par le champ électrique entre le nuage et le sol, les décharges forment un « canal » ionisé jusqu'au sol en se propageant par bonds et en ionisant des molécules d'air. Dès que le canal atteint le sol, une impulsion de courant parcourt le canal du sol vers le nuage. Le courant chauffe l'air, ce qui produit la lumière de l'éclair, nommée arc en retour, et le tonnerre.

Les éclairs sont dits négatifs quand leur canal est ionisé par des particules négatives



(électrons). Les éclairs positifs, quant à eux, ramènent des charges positives de la partie supérieure des nuages vers le sol. Les éclairs négatifs représentent environ 90 pour cent des éclairs nuage-sol. Les éclairs positifs se produisent en général à la fin des systèmes orageux importants, lorsque les nuages en forme d'enclume se situent à des altitudes élevées. En réorganisant les charges du nuage, les éclairs modifient les champs électrostatiques entre

les différentes régions chargées du nuage et engendrent un champ électrostatique au-dessus du nuage : l'éclair réorganise les charges du nuage, ce qui produit un champ électrostatique entre le nuage et l'ionosphère dirigé vers le bas pour les éclairs positifs et vers le haut pour les éclairs négatifs. Dans le cas des éclairs positifs, si ce champ est suffisamment intense, il est susceptible de déclencher des décharges qui se déplacent vers le bas depuis la mésosphère.

Christelle Forzale