

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 Forzani

notamment du Soleil, bombardent en permanence l'atmosphère terrestre.

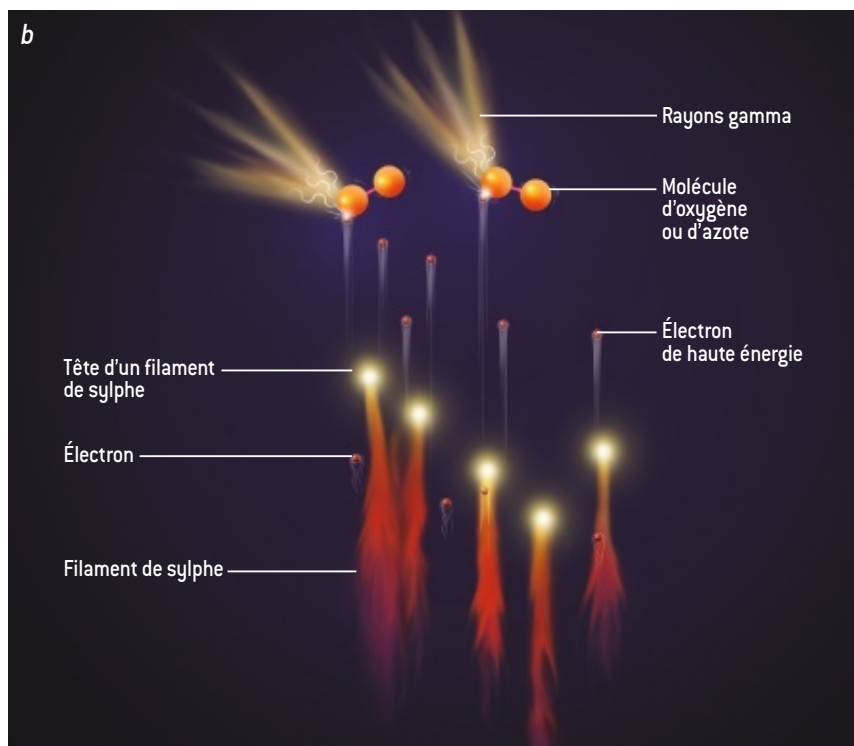
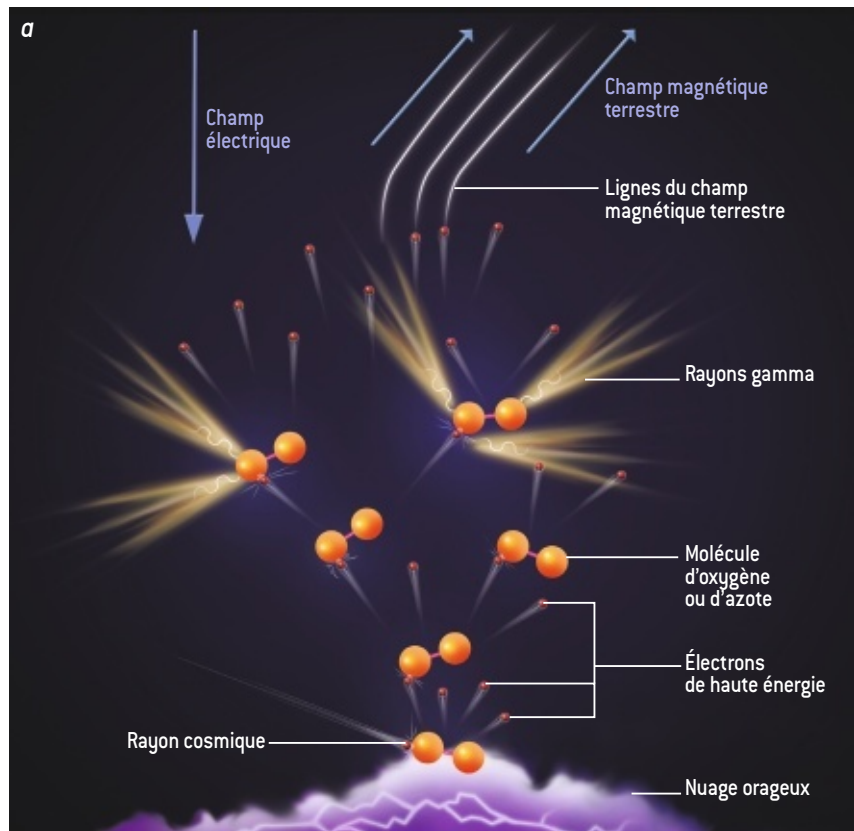
Par ailleurs, la théorie montre qu'une telle avalanche d'électrons ne s'arrête pas dans l'atmosphère supérieure. Les électrons sont accélérés vers le haut jusqu'à l'ionosphère et la magnétosphère, où ils se propagent en suivant les lignes du champ magnétique terrestre. Ils peuvent ainsi se propager jusqu'au point magnétique conjugué de celui de l'orage (l'autre bout de la ligne du champ magnétique), situé dans l'autre hémisphère de la Terre. De fait, on détecte parfois des émissions au point magnétique conjugué des orages (nous y reviendrons).

Ce mécanisme n'est pas restreint à l'atmosphère terrestre ; il pourrait se produire sur d'autres planètes. Les structures lumineuses transitoires en forme de lignes droites parfois observées dans les anneaux de Saturne pourraient être dues à de telles avalanches, déclenchées lorsque les anneaux sont magnétiquement liés aux zones orageuses. Une autre planète candidate est Jupiter, où des émissions radio produites par les éclairs ont été détectées ainsi que des flashes lumineux.

Des perles lumineuses ultrarapides

Aujourd'hui, des observations plus précises des sylphes à l'aide de caméras ultrarapides permettent de préciser ce modèle. En 2007, les séquences enregistrées à la cadence de 10 000 images par seconde par l'équipe de Hans Stenbaeck Nielsen, de l'Université d'Alaska, ont montré que les sylphes sont engendrés par des structures complexes qui se forment à 75 kilomètres environ. Des perles lumineuses apparaissent et tombent à une vitesse de 10 000 kilomètres par seconde, laissant chacune une traînée lumineuse – un filament vertical qui se développe vers le bas. Ces structures sont suivies d'autres filaments partant vers le haut et dont la forme est plus diffuse. Ces perles sont la manifestation d'une ionisation plus intense à la tête des filaments. Quand on cumule ces images afin de revenir à la cadence vidéo plus lente des premières observations, on retrouve la partie supérieure diffuse et les filaments qui en émergent vers le bas en donnant aux sylphes la forme de carottes.

Ces filaments sont des canaux de plasma, c'est-à-dire de gaz ionisé, qui se



3. LES FLASHS GAMMA D'ORIGINE TERRESTRE de basse altitude seraient produits par une avalanche d'électrons relativistes (a) : en ionisant une molécule d'air au-dessus du nuage, un rayon cosmique (une particule énergétique provenant de l'espace) libère des électrons qui frappent à leur tour des molécules d'air, créant une avalanche d'électrons énergétiques dont les collisions avec les molécules d'air produisent des rayons gamma. Entraînés le long des lignes du champ magnétique terrestre, des électrons de l'avalanche produisent aussi des effets observables dans l'autre hémisphère. Les flashes gamma de haute altitude seraient produits lors de collisions, avec les molécules d'air, d'électrons accélérés dans les têtes des filaments des sylphes (b).