

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

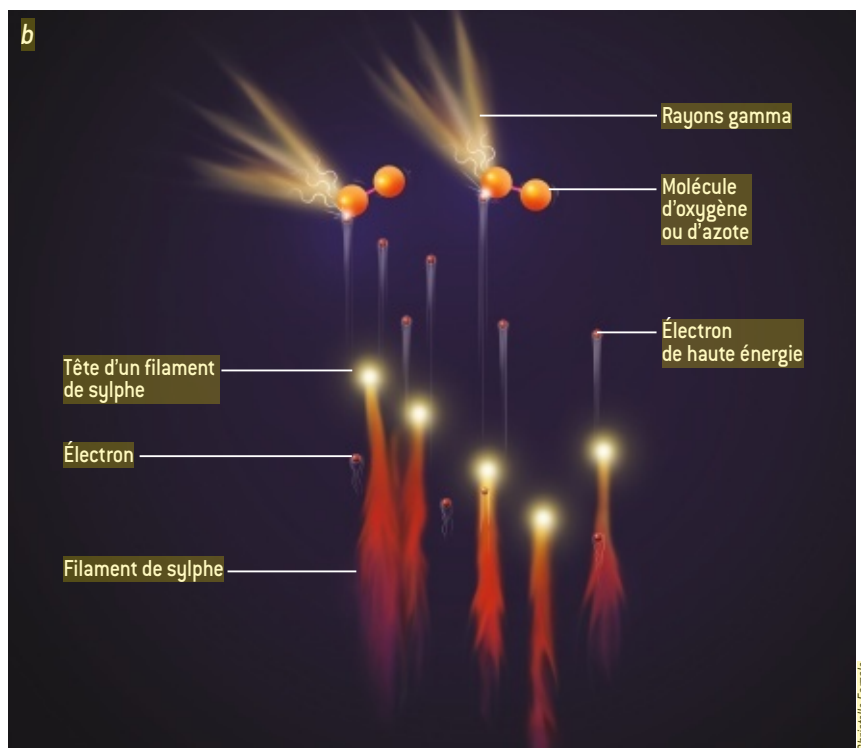
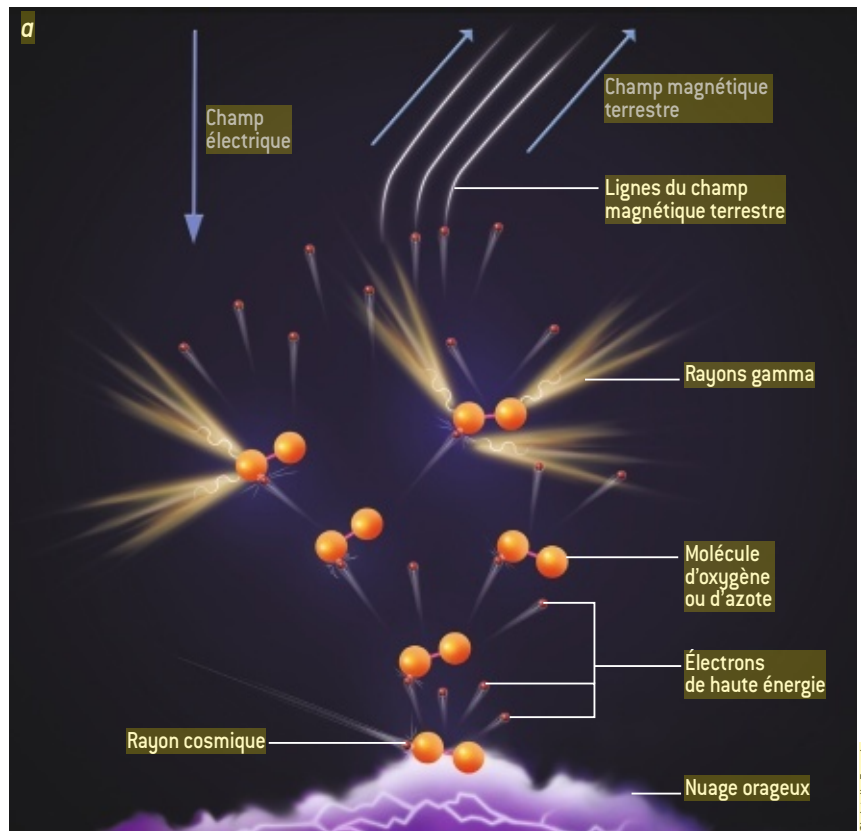
Par ailleurs, la théorie montre qu'une telle avalanche d'électrons ne s'arrête pas dans l'atmosphère supérieure. Les électrons sont accélérés vers le haut jusqu'à l'ionosphère et la magnétosphère, où ils se propagent en suivant les lignes du champ magnétique terrestre. Ils peuvent ainsi se propager jusqu'au 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).

propagent dans l'atmosphère non ionisée sous l'effet des champs électriques intenses produits par l'éclair parent. Le champ électrique à leur tête s'intensifie, comme cela peut être obtenu dans les décharges en laboratoire. Ils peuvent alors produire des branches formant la structure des sylphes.

Pour le moment, aucune théorie n'est capable d'expliquer la diversité des phénomènes lumineux. La théorie de l'avalanche, notamment, n'explique pas la formation de filaments vers le bas. Néanmoins, elle fournit des explications tout à fait plausibles d'autres phénomènes, telles certaines émissions radio détectées jusqu'à des distances de plusieurs centaines de kilomètres de la zone orageuse ou, nous allons le voir, l'émission de certains flashes gamma d'origine terrestre.

Les flashes gamma d'origine terrestre ont été détectés par hasard en 1994, par un satellite dédié à la mesure des rayons gamma dans l'espace, le satellite CGRO (*Compton Gamma-Ray Observatory*). À l'époque, seuls 76 événements de ce type ont été mesurés pendant les neuf ans de la mission, mais l'enregistrement des flashes gamma d'origine terrestre n'était pas l'objectif premier du module expérimental du satellite, l'instrument BATSE (*Burst and Transient Source Experiment*). Lancé en 2002, le satellite RHESSI (*Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager*), destiné à des observations solaires, en a détecté beaucoup plus : il a mesuré 10 à 20 flashes gamma d'origine terrestre par mois. Leur spectre en énergie peut atteindre 30 mégaélectronvolts.

À leur découverte, les flashes gamma d'origine terrestre ont été naturellement reliés aux événements lumineux transitoires et il a été suggéré que les rayons gamma pourraient résulter de l'interaction, avec l'atmosphère, de particules de haute énergie de l'avalanche invoquée pour expliquer les sylphes.

Cependant, plusieurs énigmes subsistaient. Tout d'abord, l'altitude à laquelle les flashes gamma d'origine terrestre se produisent reste mystérieuse. Plusieurs études du spectre énergétique des flashes gamma d'origine terrestre enregistrés par le satellite RHESSI, complétées de simulations, ont suggéré qu'ils avaient été produits dans la partie supérieure des nuages, soit à des altitudes inférieures à 20 kilomètres environ, et non à l'altitude où apparaissent les sylphes. En effet, les basses énergies du spectre des flashes gamma d'origine terrestre sont atténuées, signe qu'elles ont été absorbées avant leur détection par le satellite, c'est-à-dire lors de leur passage dans l'atmosphère (à l'inverse, les basses énergies de rayons gamma émis à une altitude supérieure à 20 ou 30 kilomètres ne seraient pas atténuées, l'atmosphère étant plus ténue).

Des émissions gamma au-dessus des orages

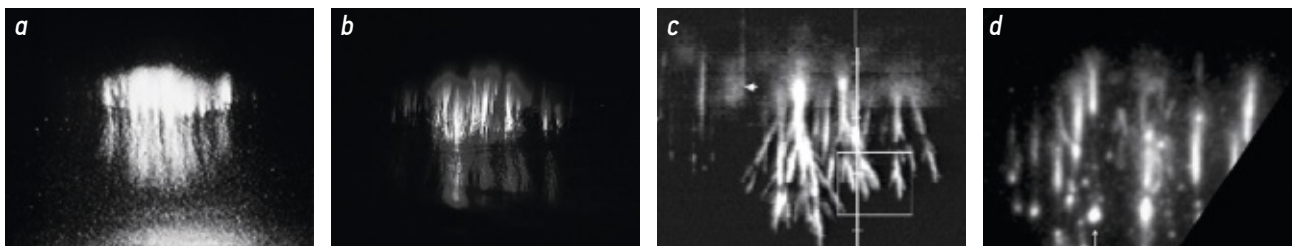
Les flashes gamma d'origine terrestre pourraient donc être produits par les éclairs et les décharges qui surviennent au sommet ou au-dessus des nuages plutôt que par les sylphes eux-mêmes. Ce que corrobore une expérience réalisée par l'équipe de Joseph Dwyer, de l'Institut de technologie de Floride : les physiciens ont produit des flashes gamma en déclenchant artificiellement des éclairs. Le mécanisme de l'avalanche pourrait expliquer la formation de tels flashes gamma au sommet des nuages.

Les observations confirment également qu'il se produit des effets au point magnétique conjugué des orages – un des effets attendus avec le modèle de l'avalanche. Un flash gamma d'origine terrestre a été observé par le satellite RHESSI au-dessus du Sahara. Ce flash gamma – le plus

long et le plus intense jamais détecté – a été observé alors qu'il n'y avait pas d'orage au Sahara, mais qu'un orage se produisait... au point magnétique conjugué. Des électrons se seraient propagés le long des lignes du champ magnétique et auraient frappé le satellite. Une nouvelle analyse des données de RHESSI a révélé d'autres événements de ce type, et plusieurs flashes gamma d'origine terrestre observés par le satellite CGRO pourraient aussi entrer dans cette catégorie. Il existerait ainsi deux classes de flashes gamma d'origine terrestre : les premiers, brefs et nombreux, seraient directement émis au-dessus des orages (par les éclairs ou par les sylphes) tandis que les seconds, plus longs et plus intenses, seraient produits par des électrons qui se seraient propagés le long des lignes du champ magnétique terrestre.

Et pour brouiller encore les pistes, des observations au sol effectuées lors des orages japonais d'hiver ont révélé que des émissions gamma ont été produites à la base des nuages orageux pendant plusieurs dizaines de secondes sans qu'il n'y ait eu d'éclair préalable. Les simulations indiquent que le mécanisme d'avalanche serait la cause de ces émissions.

Et ce n'est pas tout ! En janvier 2011, le satellite italien AGILE a détecté, lors de certains flashes gamma d'origine terrestre, des énergies atteignant 100 mégaélectronvolts – des énergies trop hautes pour être expliquées par le modèle d'avalanche d'électrons. Comment ces rayons gamma apparaissent-ils ? Les récentes simulations de Victor Pasko, de l'Université de Pennsylvanie, fournissent une nouvelle explication. Le physicien a montré qu'il se produit des accélérations très importantes d'électrons à la tête des filaments qui forment la structure des sylphes. Ces électrons auraient une énergie cinétique suffisante (ils peuvent être accélérés jusqu'à des énergies de l'ordre de dix mégaélectronvolts)



4. DIVERSES PHOTOGRAPHIES DE SYLPHES montrant l'amélioration de la résolution au fil des ans. Les premiers films de sylphes [a], réalisés avec des caméras classiques – au temps de pose supérieur à la durée du phénomène –, montraient le phénomène dans son ensemble. Avec le temps, des observations ont été réalisées au télescope pour mieux

décrire la géométrie des filaments [b], ou avec des caméras de plus en plus rapides [c]. Les observations récentes, qui combinent ces deux avantages, montrent les sylphes comme des boules lumineuses de plusieurs dizaines de mètres de diamètre émergeant d'hétérogénéités présentes dans le halo [d].