

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

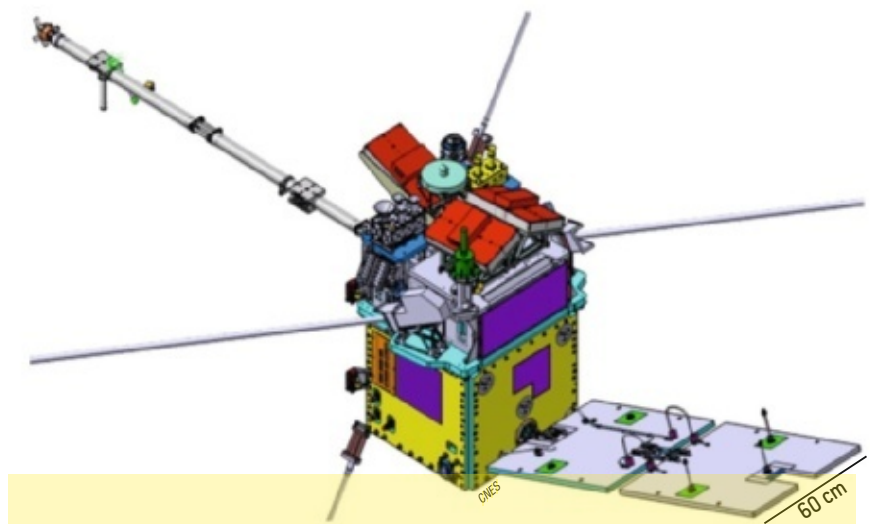
décrire la géométrie des filaments [b], ou avec des caméras de plus en plus rapides [c]. Les observations récentes, qui combinent ces deux avantages, montrent les sylphes comme des boules lumineuses de plusieurs dizaines de mètres de diamètre émergeant d'hétérogénéités présentes dans le halo [d].

pour déclencher des flashes gamma de haute énergie. De tels processus pourraient être des sources alternatives des flashes gamma d'origine terrestre observés pendant les orages, qu'ils soient déclenchés dans les filaments ionisés des sylphes ou dans les éclairs. Reste à le vérifier... et à comprendre comment des électrons atteignent de telles énergies.

Enfin, toujours en janvier 2011, le télescope spatial de rayonnement gamma *Fermi* a détecté des flashes gamma d'origine terrestre de 511 kiloelectronvolts – une énergie qui correspond très exactement à celle des photons produits lors de la collision et l'annihilation d'un électron et de son antiparticule, le positron. Cette découverte suggère que les orages engendrent la formation... d'antiparticules. L'avalanche d'électrons émet tellement de flashes gamma lors des collisions avec les molécules de l'air que suffisamment de paires électron-positron sont produites lors de l'interaction des rayons gamma avec les molécules de l'air pour que leur signature – le rayon gamma fruit de leur annihilation – soit détectée par le satellite.

Jusqu'à présent, tant pour l'étude des événements lumineux transitoires que pour celle des flashes gamma d'origine terrestre, on s'est contenté de données partielles – des observations d'un aspect particulier, parfois au détour d'une expérience visant d'autres objectifs. Pour mieux comprendre les mécanismes en jeu, notre équipe a proposé, dès 1998, d'effectuer des observations simultanées, depuis l'espace, de l'ensemble des émissions, ce qui représente un défi, car, vu de l'espace, les sylphes se superposent aux éclairs d'orage qui saturant les caméras.

La première expérience d'observation de sylphes par satellite, lancée en 2004 pour cinq ans, était limitée à des observations optiques à l'horizon. Placée à bord du satellite taïwanais FORMOSAT 2, ISUAL a détecté de nombreux elfes, sylphes, halos et jets géants, dont la distribution géographique a été établie. Les elfes ont été principalement observés au-dessus des océans dont la température dépasse 26 °C, alors que les sylphes se produisent plutôt au-dessus des continents. La formation des elfes serait favorisée par la température élevée de certaines zones océaniques : cette température provoque des phénomènes de convection verticale qui favorisent les éclairs intenses, lesquels entraînent à leur tour la formation des elfes.



5. LE MICROSATELLITE TARANIS est équipé de différents instruments pointés vers le sol qui enregistreront en parallèle les événements lumineux transitoires, les flashes gamma d'origine terrestre ainsi que les particules énergétiques venant des basses couches atmosphériques. Actuellement en construction (le lancement est prévu pour 2015), le satellite couvrira une très large gamme spectrale (rayons gamma, rayons X, ultraviolet, visible, proche infrarouge et radio).

Le projet TARANIS du programme *Myriade* du CNES, proposé par des équipes du CNRS et la nôtre, a pour objectif la mesure simultanée des flashes gamma d'origine terrestre, des événements lumineux transitoires, des émissions radio et des électrons de haute énergie à partir du même microsatellite. Nous pourrions ainsi, d'une part, décrire les mécanismes de déclenchement et, d'autre part, déterminer leur fréquence et leur impact sur l'environnement terrestre. Ces mesures doivent être effectuées depuis l'espace, car l'atténuation des flashes gamma d'origine terrestre dans l'atmosphère les rend difficilement observables du sol.

La mission TARANIS

Pour surmonter la difficulté d'observer les sylphes au-dessus des orages, nous avons proposé d'utiliser deux caméras, filmant l'une les éclairs à une fréquence correspondant à une raie d'émission des éclairs et l'autre les sylphes à une fréquence correspondant à une raie d'émission des sylphes. Il n'est pas possible de séparer les raies d'émission des sylphes et des éclairs, car elles sont produites par les mêmes molécules (l'azote et l'oxygène de l'atmosphère). Néanmoins, on peut les distinguer en observant les sylphes dans une raie d'émission (environ 762 nanomètres) correspondant à une bande d'absorption de l'atmosphère due au dioxygène. Dans cette raie, les émissions des éclairs sont davantage absorbées que celles des sylphes qui se produisent à plus haute altitude (où il y a moins d'oxygène). En utilisant deux caméras, l'une qui se trouve dans cette

bande et une autre qui privilégie les éclairs, il est possible de séparer, par traitement au sol, la réponse des sylphes de celle des éclairs. Ce procédé a été validé par l'expérience LSO (*Lightning and Sprite Observations*), pilotée dans les années 2001 à 2004 par Claudie Haigneré et d'autres astronautes de l'Agence spatiale européenne sur la Station spatiale internationale.

Actuellement en construction, le satellite TARANIS doit être lancé en 2015. Sa charge utile inclut des instruments optiques, des détecteurs d'électrons de haute énergie, des antennes électriques et magnétiques couvrant une gamme de fréquences très étendue et trois détecteurs de rayons X et gamma. Bénéficiant d'un mode d'observation des événements transitoires à haute résolution et d'un mode de surveillance fonctionnant en continu, TARANIS pourra caractériser l'ensemble des phénomènes à toutes les échelles temporelles possibles.

D'autres projets spatiaux, également en phase de construction, ont des objectifs similaires : le projet ASIM vise à observer les flashes gamma d'origine terrestre et les événements lumineux transitoires sur la Station spatiale internationale en liaison avec les paramètres climatiques, tandis que le projet GLIMS, également depuis la Station spatiale internationale, dispose de dispositifs optiques pour observer les événements lumineux transitoires tout en mesurant simultanément des émissions radio de très haute fréquence.

Les prochaines années devraient ainsi fournir les observations nécessaires pour mieux comprendre ces aspects nouveaux de l'activité orageuse, ainsi que l'effet de ces émissions variées sur l'environnement. ■