

Étranges phénomènes lumineux et bouffées de rayons gamma observés au-dessus des orages

Jean-Louis Pinçon, Sébastien Celestin

▶ **To cite this version:**

Jean-Louis Pinçon, Sébastien Celestin. Étranges phénomènes lumineux et bouffées de rayons gamma observés au-dessus des orages. Reflets de la Physique, 2016, 47-48, pp.71 - 75. 10.1051/refdp/20164748071 . insu-01556548

HAL Id: insu-01556548
https://insu.hal.science/insu-01556548

Submitted on 5 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étranges phénomènes lumineux et bouffées de rayons gamma observés au-dessus des orages

Jean-Louis Pinçon (jean-louis.pincon@cnrs-orleans.fr) et **Sébastien Célestin**
LPC2E, UMR 7328, CNRS et Université d'Orléans, 3A avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex 2

Depuis le début des années 1990, on sait que l'atmosphère au-dessus des orages est le lieu de phénomènes lumineux regroupés sous le terme générique de *Transient Luminous Events* (TLE), et de bouffées de photons de haute énergie appelées *Terrestrial Gamma-ray Flashes* (TGF).

Afin de répondre aux questions en suspens sur les mécanismes à l'origine de ces phénomènes et sur leurs impacts sur la physico-chimie de la haute atmosphère, le satellite TARANIS du CNES sera lancé en 2018. Les nouvelles observations ainsi obtenues, combinées à celles des réseaux d'observations au sol, pourront être comparées aux prédictions issues des modèles théoriques.

La découverte des TLE

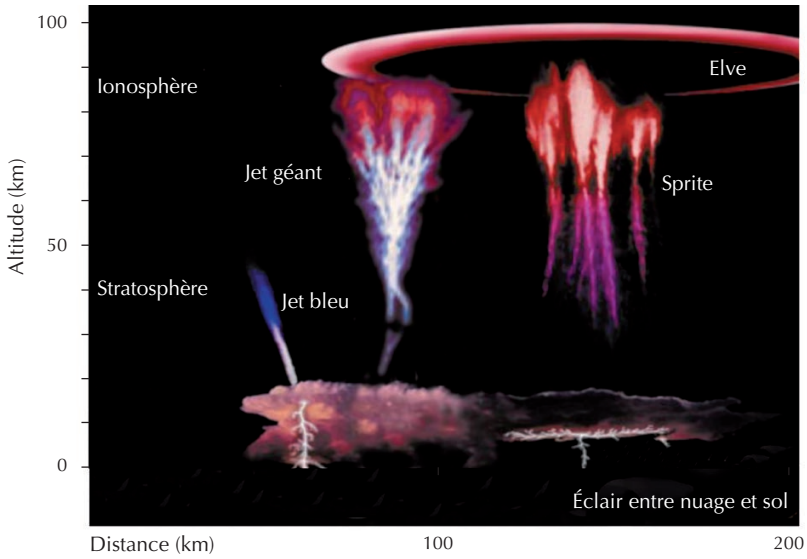
La première observation documentée d'un TLE date de 1989 [1]. Afin de tester la sensibilité d'un nouveau modèle de caméra conçu pour équiper une fusée sonde, une équipe de recherche de l'Université du Minnesota (États-Unis) décide de viser de nuit une étoile de luminosité bien connue. Or, cette nuit-là, à partir du poste d'observation choisi par l'équipe, l'étoile visée se trouve être juste au-dessus d'un orage distant. De retour au laboratoire, l'équipe a la surprise de découvrir que les images prises par la caméra mettent en évidence d'étranges flashs lumineux localisés au-dessus de l'orage. Il s'agit de la première image d'un *Sprite*. Cette découverte fait grand bruit et marque le début d'une chasse aux phénomènes lumineux au-dessus des nuages d'orages. Les découvertes se sont ensuite rapidement enchaînées, et on sait maintenant qu'il existe toute une série de phénomènes lumineux distincts (différentes altitudes, topologies, durées) se produisant dans la très haute atmosphère entre le sommet des nuages d'orage et l'ionosphère.

Ces phénomènes lumineux, qui ont en commun d'être très brefs, sont regroupés sous le terme générique de TLE (*Transient Luminous Events*). Les nombreuses observations collectées ces dernières années montrent que, contrairement à ce que l'on supposait initialement, il s'agit de phénomènes fréquents pouvant se produire à toutes les latitudes et dépendant principalement de la seule existence d'une activité orageuse significative [2].

Les caractéristiques des TLE

Les principaux types de TLE répertoriés à ce jour sont les *Elves*, les *Sprites* et les *Jets* (Jets bleus et Jets géants). Ils sont représentés sur la figure 1.

›››



1. Vue d'artiste des TLE (crédit V.P. Pasko [4], avec la permission de *Nature*).

Article disponible sur le site http://www.refletsdelaphysique.fr ou http://dx.doi.org/10.1051/refdp/20164748071

Les *Elves* se présentent sous la forme d'un anneau lumineux en extension rapide, centré au-dessus d'un éclair appelé « éclair parent », et se propagent à la frontière inférieure de l'ionosphère, soit à environ 90 km d'altitude. Ils ne durent typiquement qu'une milliseconde, ce qui fait que l'observation de ces phénomènes n'est possible qu'à l'aide d'une instrumentation adaptée. Ce sont les plus fréquents des TLE ; les orages les plus actifs peuvent produire des centaines, voire des milliers d'*Elves* en quelques heures [3].

Les *Sprites* se produisent entre 40 et 90 km d'altitude et durent de quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes. Les observations faites à l'aide de caméras ultrarapides montrent qu'ils possèdent une structure filamentaire complexe composée d'éléments se propageant soit vers le bas (*Columniform Sprite*), soit simultanément vers le haut et le bas (*Carrot Sprite*). L'ensemble peut être ou non accompagné d'un halo. Typiquement, un *Sprite* fait suite à l'apparition d'un puissant éclair entre nuage et sol, entraînant l'évacuation brutale d'une grande quantité de charges électriques de la partie supérieure du nuage d'orage.

Les *Jets* sont initiés au niveau de la surface supérieure des nuages d'orage. Ils se propagent typiquement jusqu'à 40 ou 50 km d'altitude et la lumière émise est principalement bleue, d'où le nom de Jets bleus (*Blue Jets*). Exceptionnellement, les *Jets* peuvent atteindre 80 à 90 km d'altitude, la lumière émise au-delà de 40 km d'altitude est alors principalement rouge et ils peuvent durer plusieurs centaines de millisecondes. Ces Jets géants (*Gigantic Jets*) sont particulièrement rares et on ne connaît jusqu'à présent que quelques dizaines de cas documentés.

Les différences d'altitude de génération, de topologie et de durée des TLE reflètent la diversité des mécanismes à l'origine de ces phénomènes, bien qu'ils soient tous reliés aux décharges électriques se produisant dans les nuages d'orages. L'état de notre connaissance sur les mécanismes à l'origine des TLE dépend du type de TLE considéré. Nous avons une bonne compréhension des processus physiques à l'origine des *Elves*, la situation est déjà bien moins satisfaisante pour ce qui est des *Sprites* et la physique des *Jets* reste mal connue.

Le terme *Elves* est un acronyme pour "Emission of Light and VLF perturbation from an EMP Source" [5]. Lors d'un éclair entre nuage et sol, une impulsion électromagnétique (EMP en anglais) rayonne radialement dans l'atmosphère, principalement dans la bande VLF (*Very Low Frequency*, 3 kHz – 30 kHz). Les *Elves* sont la manifestation optique de l'interaction de cette EMP avec l'ionosphère. L'ionosphère s'étend entre environ 80 et 600 km d'altitude. Elle recouvre la partie supérieure de l'atmosphère, pour laquelle les molécules sont ionisées par le rayonnement ultraviolet solaire. Les électrons libres disponibles en abondance au voisinage de la frontière basse ionosphérique sont chauffés par l'EMP et entrent en collision avec les molécules neutres de l'ionosphère. Ces collisions produisent une ionisation des molécules et l'émission lumineuse observée. L'anneau lumineux en expansion rapide caractéristique des *Elves* est la signature de la propagation de l'EMP à la frontière basse de l'ionosphère. Les modélisations 3D actuellement disponibles [6] reproduisent fidèlement toutes les propriétés des *Elves* observés.

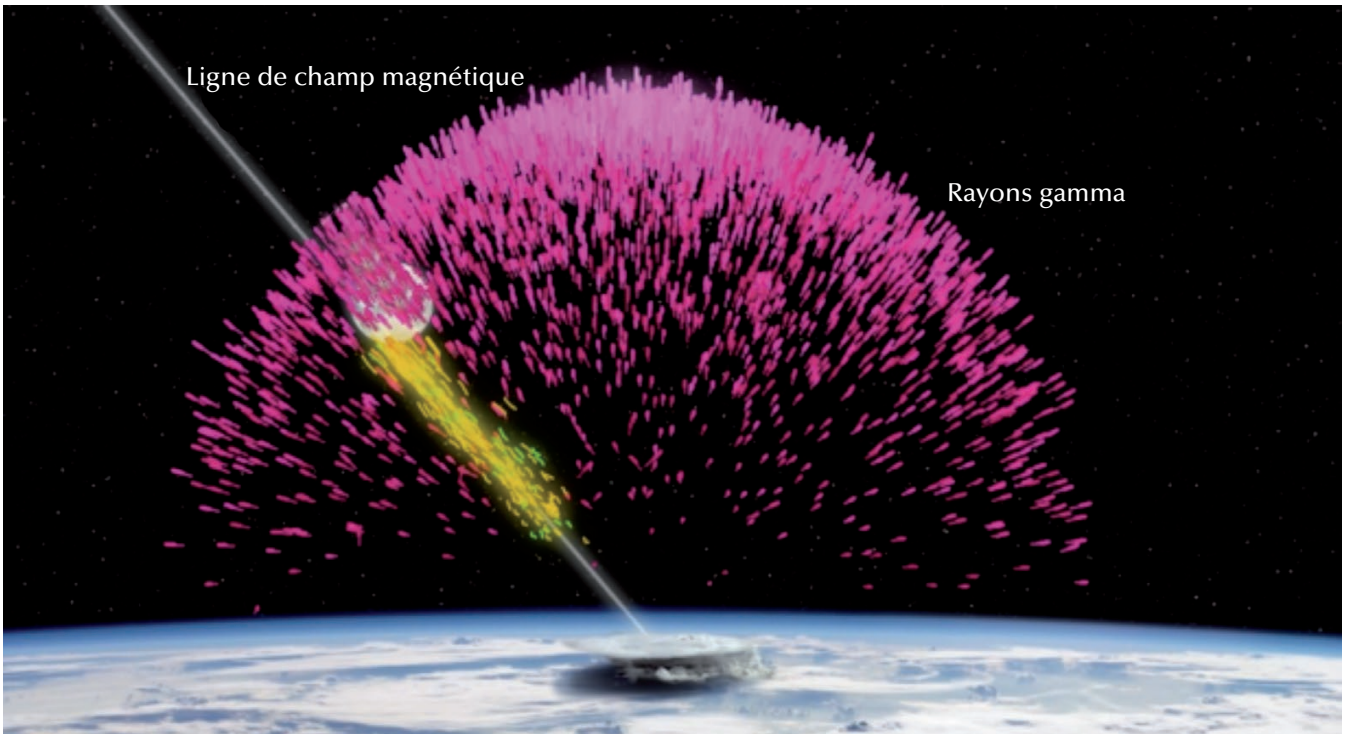
Les conditions nécessaires à la génération d'un *Sprite* sont maintenant assez bien comprises [7]. En temps normal, les charges positives qui s'accumulent dans la partie supérieure du nuage d'orage ne génèrent pas de champ électrique notable dans la haute atmosphère, car la mobilité des charges électriques dans les couches supérieures de l'atmosphère est suffisante pour neutraliser au fur et à mesure le champ électrique produit par la charge au sommet de l'orage. Toutefois, si un éclair se produit entre le sommet du nuage et le sol, une fraction importante de la charge positive peut être alors évacuée en quelques dizaines de microsecondes. Ce changement est bien trop rapide pour que les charges d'écrantage de la haute atmosphère puissent le compenser et, en conséquence, un fort champ électrique va pouvoir exister au-dessus du nuage d'orage pendant quelques dizaines de millisecondes. On montre alors que, si la variation du moment de charge par l'éclair parent (charge évacuée par l'éclair multipliée par la hauteur entre la zone de charge positive dans le nuage et le sol) est suffisante, le champ électrique résultant, au-dessus de 70 km d'altitude, pourra être supérieur au champ de claquage local de l'atmosphère. Les conditions sont réunies pour qu'un *Sprite* puisse se produire. Ce modèle est consistant avec les caractéristiques générales des *Sprites* (par exemple l'altitude de génération ou encore le lien avec la variation du moment de charge par l'éclair parent [8]), mais il reste encore beaucoup à faire pour comprendre la structure filamentaire extrêmement complexe de ces phénomènes.

Les TLE sont des phénomènes relativement fréquents, ce qui pose la question de leur impact sur la physico-chimie de la haute atmosphère. Des travaux récents [9, 10], ainsi que des mesures sur la génération d'oxyde d'azote NO_x effectuées sur des décharges de laboratoires [11], indiquent que la concentration locale de NO_x dans la haute atmosphère pourrait être multipliée par un facteur 100 suite à la génération d'un *Sprite*. Ces travaux sont toutefois controversés et des données complémentaires sont nécessaires pour conclure sur ce point.

La découverte des TGF

À bord de la navette spatiale Atlantis, la NASA lance en 1991 le *Compton Gamma-Ray Observatory* (CGRO) dont le but est d'observer les sources célestes de rayons X et gamma. Il s'agit alors du deuxième satellite lancé dans le cadre du programme « Grands Observatoires » de la NASA, le premier étant le célèbre télescope Hubble. Depuis les années 1960 et les satellites Vela lancés dans le cadre de la surveillance du respect du Traité d'Interdiction Partielle des Essais Nucléaires signé par l'URSS et les États-Unis, les scientifiques savent que l'Univers est peuplé de phénomènes produisant des bouffées de rayons gamma, appelés sursauts gamma. Aujourd'hui, on estime qu'ils sont liés à certains évènements extrêmes tels que des supernovæ formées par l'effondrement du cœur d'une étoile massive (sursauts longs : durée supérieure à deux secondes), et la collision d'étoiles à neutrons appartenant à un système binaire ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir (sursauts courts : durée inférieure à deux secondes et, généralement, de l'ordre du dixième de seconde).

Alors que CGRO poursuit sa mission nominale, les scientifiques en charge de l'instrument *Burst and Transient Source*



2. Représentation de la production d'un TGF par un nuage d'orage terrestre, et du faisceau d'électrons (points jaunes) et de positrons (points verts) associé, confiné par le champ magnétique terrestre. Crédit : NASA - Goddard Space Flight Center/Joe Dwyer, Florida Inst. of Technology.

Experiment (BATSE) à bord de CGRO découvrent que des bouffées de rayons gamma proviennent de la Terre [12]. Ces flashes gamma sont très brefs, très intenses, et ont un spectre en énergie très dur (rapport élevé entre les nombres de photons de haute énergie et de plus basse énergie) qui est typique du rayonnement de freinage, ou *bremsstrahlung*, d'électrons dans l'atmosphère terrestre. De plus, ces émissions sont toujours observées lorsque des nuages d'orage sont présents en dessous du satellite (fig. 2). Ces évènements, appelés *Terrestrial Gamma-ray Flashes* (TGF), ont depuis été détectés par d'autres missions spatiales dédiées à l'étude des phénomènes astrophysiques de haute énergie : RHESSI (NASA), AGILE (Agence Spatiale Italienne, ASI) et Fermi (NASA).

Caractéristiques des TGF

On a d'abord pensé que les TGF étaient produits par des *Sprites*, eux-mêmes nouvellement découverts (voir ci-dessus), mais la comparaison entre des résultats de modèles et les observations de RHESSI ont permis de montrer que les TGF devaient être produits à des altitudes de l'ordre de 15 km [13], c'est-à-dire au niveau du sommet des orages tropicaux. Depuis, il a été montré que les TGF sont temporellement associés, à quelques microsecondes près, à l'initiation d'éclairs intranuages négatifs, qui sont les éclairs les plus communs.

Les TGF ont des durées beaucoup plus courtes que les sursauts gamma astronomiques. Les observations montrent qu'ils durent de 50 µs à 1 ms, avec un maximum de distribution autour de 100 µs. La fluence mesurée par les différents instruments à bord des satellites est un peu moins de un photon par centimètre carré. Toutefois, les instruments aujourd'hui capables de détecter les TGF saturent, car ils ont été développés pour mesurer les phénomènes gamma astronomiques sur des temps beaucoup plus longs. On ne connaît donc pas précisément la fluence maximale des TGF. Pour cette raison, l'instrument XGRE qui détectera les photons gamma à bord du satellite TARANIS (voir pp. 74-75 et figure 3) a été conçu pour être extrêmement rapide et donc peu affecté par les forts flux de photons. Il apportera des éléments nouveaux d'une très grande importance pour la compréhension des TGF. L'énergie maximum typiquement observée dans un TGF est de l'ordre de 20 MeV, et est liée aux propriétés physiques de la source du TGF ainsi qu'à la position relative du satellite par rapport à la source. L'énergie minimum est de l'ordre de 20 keV, et est due au fait que les photons de plus basse énergie sont absorbés dans l'atmosphère terrestre.

Grâce aux résultats des satellites AGILE et Fermi, ainsi que d'une nouvelle analyse des résultats de RHESSI, on sait maintenant que les TGF ne sont pas des évènements rares. En effet, on estime que les TGF produits sur l'ensemble de la planète et potentiellement détectables par l'instrument *Gamma ray Burst Monitor* (GBM) à bord de Fermi, sont au nombre de 400 000 par an [14]. Il s'agit là d'un minimum car les instruments opérationnels actuellement ne sont pas optimisés pour la détection des TGF, et il n'est pas impossible qu'en fait, tous les éclairs intranuages produisent des TGF [15]. Dans ce contexte, il est intéressant de noter qu'on estime que 30 éclairs intranuages se déclenchent par seconde à la surface du globe, soit environ 3 millions par jour.

›››

Les orages se comportent comme des accélérateurs de particules

L'observation de bouffées de rayons gamma comme produits du *bremsstrahlung* d'électrons énergétiques dans les orages était inattendue, car il est difficile d'accélérer des particules dans un milieu dense tel que la troposphère terrestre à cause des multiples collisions avec les molécules de l'air. Par exemple, au moment où il est visible, un éclair est un plasma à l'équilibre thermique qui peut atteindre des températures de l'ordre de 10 000 K. Cependant, dans ce système, les électrons sont thermalisés à cause de leurs collisions avec les molécules de l'air et n'ont finalement des énergies cinétiques guère supérieures à quelques électronvolts, c'est-à-dire de l'ordre de 10 millions de fois inférieures à celles requises pour produire un TGF. En fait, sous l'action d'un champ électrique, l'énergie gagnée par les électrons faiblement énergétiques est perdue dans les collisions qu'ils subissent. Il nous faut donc considérer que les processus qui génèrent les TGF produisent des électrons non thermiques, qui peuvent gagner des énergies très élevées (de l'ordre de la dizaine de MeV) : ce sont les *électrons runaway* (voir encadré).

Deux théories permettent d'expliquer l'origine des TGF. La première est fondée sur l'avalanche d'électrons *runaway* relativistes (RREA) à partir d'électrons énergétiques préexistants. Des électrons de haute énergie (de l'ordre du MeV) sont en effet présents en permanence dans la troposphère, à cause des rayons cosmiques qui bombardent l'atmosphère terrestre. Si les champs électriques de grande échelle présents dans les orages sont suffisamment intenses, ces électrons *runaway* peuvent être continûment accélérés (voir encadré). Lors de leur propagation, ces électrons sont en mesure d'ioniser les molécules d'air et de produire des électrons secondaires. En de rares occasions, des électrons secondaires de haute énergie sont produits et accélérés par le champ électrique de l'orage. Si la zone couverte par le champ est suffisamment étendue, une avalanche d'électrons *runaway* peut donc avoir lieu. C'est le *bremsstrahlung* associé à ces électrons qui constitue le TGF. En pratique, d'autres processus tels que l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la production de paires électron-positron par les photons issus du *bremsstrahlung* dans la zone d'avalanche doivent être pris en compte. L'ensemble de ces processus secondaires est à même de former de nouvelles avalanches : ce mécanisme est appelé « *feedback* relativiste » [16].

La deuxième théorie est fondée sur la production d'électrons *runaway* thermiques directement par des éclairs internes au nuage. La propagation des éclairs est un processus extrêmement complexe. Les branches négatives d'un éclair ne se propagent pas de manière continue mais par pas successifs. On montre qu'à chaque pas est associée une bouffée de décharges couronnes peuplée de plasmas filamentaires qui ont la propriété remarquable de produire des champs électriques extrêmes en tête du filament. Sous certaines conditions, ces champs peuvent être suffisamment élevés pour produire des électrons *runaway* thermiques (voir encadré), lesquels peuvent être alors accélérés par le champ électrique de plus grande échelle de l'éclair. Le TGF est constitué du *bremsstrahlung* associé à ces électrons *runaway*. Notons que ce mécanisme permet également d'expliquer les bouffées de rayons X (de plus faible énergie que les TGF) produits par les éclairs nuage-sol et observés depuis le sol [16].

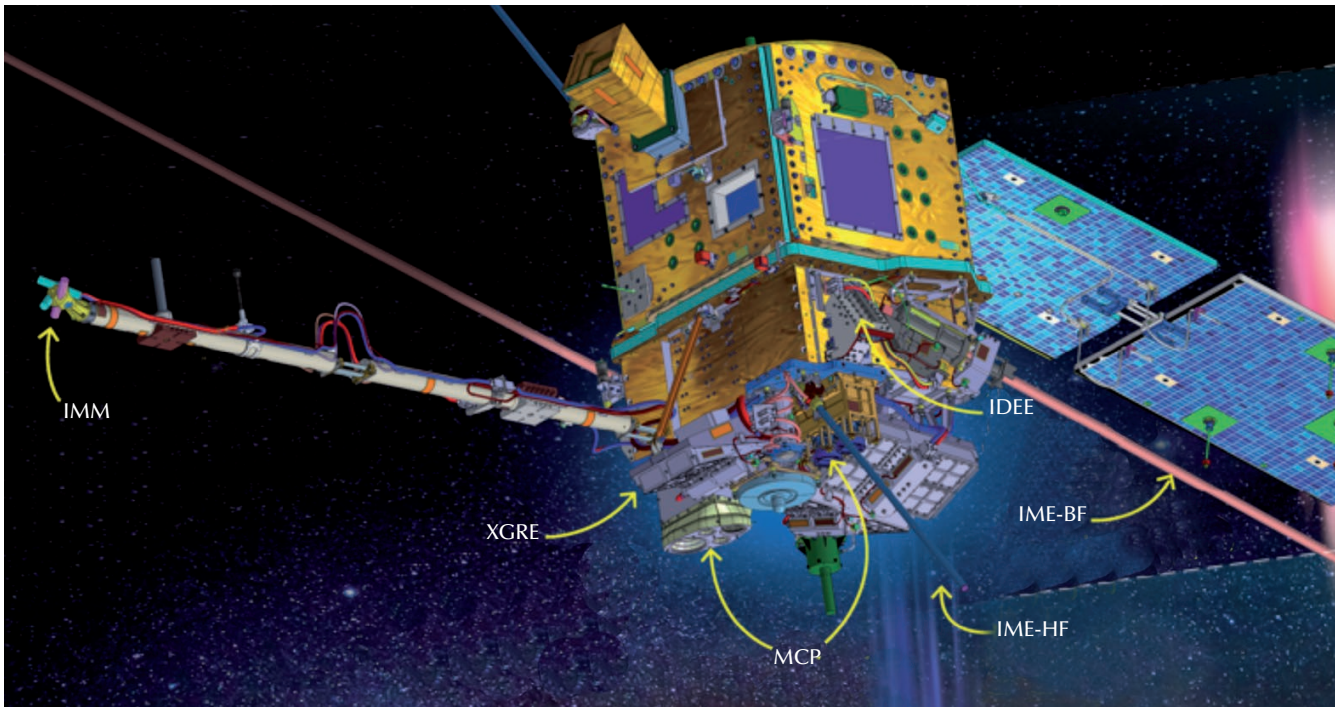
Bien que les RREA requièrent des champs électriques plus forts que ceux généralement observés dans les orages, les spectres des TGF prédits par cette théorie sont en excellent accord avec les observations. Les spectres prédits par la théorie associant les TGF aux éclairs intranuageux sont aussi en bon accord avec les observations si la chute de potentiel en tête d'éclair est suffisamment grande, ce qui permet d'imposer des contraintes aux modèles. En outre, cette dernière théorie implique une connexion naturelle entre les TGF et les éclairs intranuageux.

Découverts relativement récemment, les TGF comportent encore beaucoup d'inconnues. Les étudier nous permettra : de mieux connaître et modéliser l'électrification des orages, de mieux évaluer les risques sur les passagers à bord d'aéronefs traversant les nuages d'orages [17], d'évaluer les effets des orages sur l'avionique [18], d'améliorer notre compréhension de la propagation des éclairs et de leurs effets dans le système atmosphère-ionosphère-magnétosphère. Les TGF sont aussi associés à la production de faisceaux d'électrons et de positrons de haute énergie confinés par le champ magnétique terrestre (fig. 2), lesquels représentent une source non encore évaluée de particules énergétiques dans la magnétosphère.

La mission spatiale TARANIS

Depuis la découverte des TLE et des TGF, la compréhension des mécanismes physiques à l'origine de ces phénomènes a nettement progressé. Toutefois, les données disponibles à ce jour ne permettent pas toujours de trancher sans ambiguïté entre les différents processus de génération proposés. Ainsi, par exemple, le rayonnement gamma des TGF est absorbé par les couches denses de la basse atmosphère et ils ne peuvent donc être détectés qu'à partir de l'espace. Or, les observations spatiales actuellement disponibles proviennent d'instruments dont les caractéristiques et les performances ne sont pas adaptées à la nature des TGF. Du fait de la barrière que constitue le nuage d'orage, les TLE ne peuvent être observés à partir du sol qu'à la condition de se trouver en hauteur et à une grande distance du foyer orageux. L'éloignement, combiné à l'absorption par les couches denses de la basse atmosphère, rend très difficile l'obtention de données pertinentes pour l'étude de la microphysique de ces phénomènes.

Cette situation devrait être résolue par le lancement sur une orbite basse, courant 2018, du satellite TARANIS du CNES. TARANIS fournira à la communauté scientifique des jeux de données à haute résolution mesurées depuis l'espace. L'instrumentation embarquée est spécifiquement conçue pour l'étude des TLE et TGF et comprend des caméras, des photomètres, un détecteur gamma, des détecteurs d'électrons énergétiques, ainsi que des capteurs électriques et magnétiques (fig. 3). De telles mesures, combinées aux mesures au sol, sont requises pour : (i) identifier et caractériser toutes les signatures potentielles des TLE et TGF ; (ii) établir une connexion précise entre l'activité électrique de l'orage et la production des TLE et TGF ; (iii) résoudre les ambiguïtés actuelles sur les mécanismes de génération et quantifier les effets des TLE et TGF sur la physico-chimie de la haute atmosphère.



© CNES

3. Les instruments de la charge utile scientifique de TARANIS.
MCP : caméras et photomètres dans différentes bandes spectrales. **XGRE :** détecteurs X et γ (20 keV – 10 MeV). **IDEE :** détecteurs d'électrons (70 keV – 4 MeV). **IME :** antennes BF et HF de mesure de champ électrique (0 à 35 MHz). **IMM :** mesures de champ magnétique (5 Hz à 1 MHz).

Conclusion

L'étude des TLE et TGF et, plus généralement, les recherches sur l'électricité atmosphérique sont actuellement des domaines qui font l'objet d'une intense activité scientifique. À partir de 2018, les nouvelles informations sur les TLE et TGF provenant de la combinaison des observations au nadir de TARANIS avec les mesures des réseaux d'observations au sol devraient nous permettre d'obtenir des réponses aux nombreuses questions en suspens sur les mécanismes à l'origine de ces phénomènes et sur l'impact qu'ils pourraient avoir sur la physico-chimie de la haute atmosphère. ▮

Les électrons *runaway*

Les électrons se propageant dans l'air avec des énergies élevées (généralement au-delà du keV) ont une probabilité très réduite de collision avec les molécules. En conséquence, sous l'action d'un champ électrique suffisamment fort (mais faible comparé au champ de claquage dans l'air), ils ont la propriété de gagner plus d'énergie du champ électrique qu'ils n'en perdent par collisions avec les molécules de l'air. Ces électrons, qui ont la particularité d'accélérer continûment dans un milieu dense tel que l'air et d'émettre du rayonnement dur (X ou gamma) par *bremsstrahlung*, sont appelés électrons *runaway* et sont à la base des théories sur l'origine des TGF.

Il existe deux façons d'obtenir des électrons *runaway* : (1) le processus *runaway* relativiste, pour lequel des électrons énergétiques préexistants accélèrent dans un champ électrique homogène ; (2) le processus *runaway* thermique, pour lequel des champs électriques localement très intenses transforment des électrons de basse énergie (généralement thermalisés avec des énergies de l'ordre de l'électronvolt) en électrons *runaway*. L'amplitude du champ électrique nécessaire pour produire ce phénomène dans l'air à une pression de 1 atm est d'environ 260 kV/cm, soit près de 10 fois le champ de claquage (champ électrique au-dessus duquel l'air devient ionisé) dans les mêmes conditions. Seuls de très rares processus naturels produisent des champs électriques aussi intenses, et les plasmas filamentaires associés à la propagation des éclairs dans les nuages en font partie.

Références

1• R.C. Franz *et al.*, *Science*, **249** (1990) 48–51.
2• A.B. Chen *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **113** (2008) A08306.
3• R.T. Newsome et U. S. Inan, *J. Geophys. Res.*, **115** (2010) A00E41.
4• V.P. Pasko, "Electric jets", *Nature*, **423** (2003) 927–929.
5• H. Fukunishi *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **23** (1996) 2157–2160.
6• R.A. Marshall *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **115** (2010) A00E17.
7• V.P. Pasko *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **102**(A3), (1997) 4529-4561.
8• V.P. Pasko *et al.*, *Surv. Geophys.*, **34** (2013) 797.
9• F.J. Gordillo-Vazquez, *J. Phys. D Appl. Phys.*, **41** (2008) 234016.
10• F.J. Gordillo-Vazquez, *J. Geophys. Res.*, **115** (2010) A00E25.
11• H. Peterson *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **114** (2009) A00E07.
12• G. Fishman *et al.*, *Science*, **264** (1994) 1313.
13• J.R. Dwyer et D.M. Smith, *Geophys. Res. Lett.*, **32** (2005) L22804.
14• M.S. Briggs *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **118** (2013) 3805.
15• N. Østgaard *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **117** (2012) A03327.
16• J.R. Dwyer *et al.*, *Space Sci. Rev.*, **173** (2012) 133.
17• J.R. Dwyer *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **115** (2010) D09206.
18• M. Tavani *et al.*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13** (2013) 1127.