

## PHÉNOMÈNES ATMOSPHÉRIQUES TRANSITOIRES : LE PROJET TARANIS

E. BLANC, T. FARGES  
CEA - DAM - Île-de-France

**L**a découverte, ces quinze dernières années, des phénomènes lumineux transitoires dans la haute atmosphère, et des flashes gamma d'origine terrestre, remet en question notre compréhension de l'environnement stratifié de la terre. La fréquence d'occurrence de ces phénomènes au dessus des foyers orageux, et les énergies impliquées révèlent un transfert d'énergie impulsif entre la troposphère et les couches supérieures de l'atmosphère qui n'était pas soupçonné jusqu'à présent. Ces phénomènes ont des effets non encore quantifiés, et font intervenir de nouveaux processus de physique fondamentale qui pourraient avoir des implications plus larges et se manifester ailleurs dans l'univers. Le projet de microsatellite TARANIS, qui a été sélectionné en 2007 [1], a pour objectif la détermination de l'origine de ces phénomènes transitoires et de leurs effets sur l'environnement, à partir de la mesure simultanée, au nadir, de l'ensemble des émissions intervenant dans ces phénomènes



### Le contexte scientifique

Depuis la découverte, par hasard, de très brefs phénomènes lumineux dans la haute atmosphère, sur des images de caméra prises pendant la nuit, et d'une ré-analyse d'images d'éclairs prises depuis la navette spatiale, il est apparu que des émissions lumineuses se produisent vers le haut, au dessus des orages atmosphériques. D'autres observations ont alors révélé une large diversité d'émissions lumineuses apparaissant entre le sommet des nuages d'orage et l'ionosphère inférieure à 90 km d'altitude. Elles ont été classées selon leur morphologie et appelées : sprites en colonne ou en carotte, jets, jets géants, angels, halos, elves, trolls, puis regroupées sous le nom d'événements lumineux transitoires : *TLEs*. Leur extension horizontale varie de 1 à quelques mètres au niveau des filaments de la base des sprites, à des distances de l'ordre de 300 km pour les elves. Ces émissions sont observées à l'horizon, où elles se différencient spatialement des émissions des éclairs d'orage [2]. La découverte, par des satellites d'astronomie gamma [3], de flashes gamma d'origine terrestre (*TGFs*) a montré que les énergies mises en jeu atteignent 20 MeV, et sont comparables par certains aspects aux émissions observées dans le soleil ou d'autres objets célestes. Cependant, ces phénomènes ne durent que quelques centaines de microsecondes à plusieurs centaines de millisecondes.

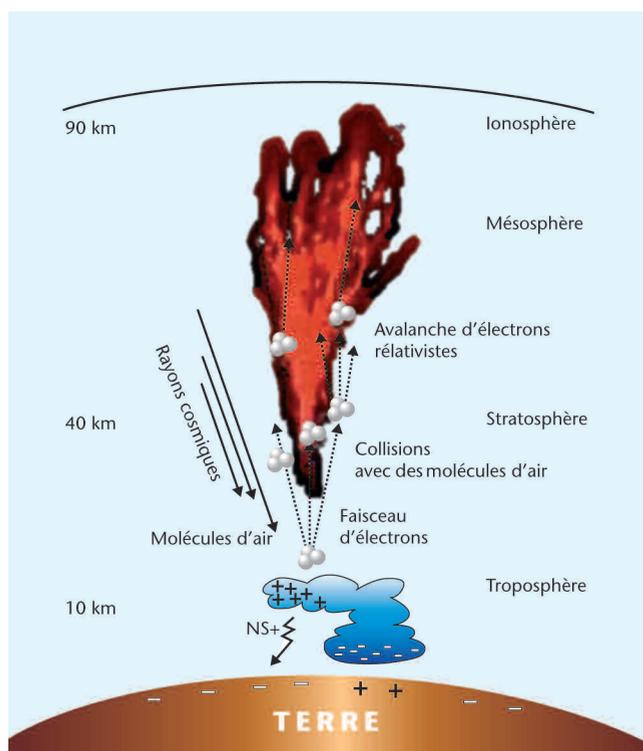
La volonté de mieux comprendre les *TLEs* et les *TGFs* a entraîné une multitude de mesures depuis le sol, en ballon, en avion ou depuis l'espace, avec des caméras intensifiées et très rapides, des télescopes, des spectrographes, des antennes électriques ou magnétiques couvrant la gamme ELF (*extrêmement basse fréquence*) à VHF (*très haute fréquence*), des radars HF, des détecteurs X et gamma.

Il a été établi que l'énergie totale dissipée par les *TLEs* pris individuellement se compte en dizaines de mégajoules, et que les puissances sont mesurées en gigawatts. Les densités électroniques générées dans l'ionosphère inférieure atteignent  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ , et ces électrons dont l'énergie peut être extrêmement élevée, produisent des émissions dans tout le spectre électromagnétique. Alors que certains aspects des mécanismes source des *TLEs* sont mieux maîtrisés, les détails ne le sont pas. Le rôle joué par les mécanismes de décharge, de claquage conventionnel (*semblable aux décharges produites en laboratoire*), et les avalanches d'électrons froids ou relativistes (*figure 1*) semblent évidents dans certains cas, mais ne s'appliquent pas à d'autres cas. Aucune théorie ne peut expliquer toute la diversité des *TLEs* observés, et de nombreuses questions sont posées sur la compréhension globale des phénomènes, et sur la connexion entre les *TLEs*, les *TGFs*, et les autres types d'émissions.

## Le projet TARANIS

Pour comprendre le lien entre ces émissions, et déterminer les mécanismes sources, il est nécessaire de mesurer simultanément l'ensemble des émissions produites. Ceci ne peut se faire que depuis l'espace, car les TGFs sont absorbés dans l'atmosphère, et car les émissions se produisent avec un certain effet directif vers le haut. Nous avons proposé d'effectuer les observations optiques depuis le haut, dans des bandes spectrales correspondant aux raies d'absorption de l'atmosphère. Les émissions des éclairs d'orage qui se produisent à basse altitude sont fortement absorbées, alors que les émissions des TLEs qui se produisent à plus haute altitude, là où l'atmosphère est moins dense, sont peu absorbées. Ce concept de mesure a été validé par l'expérience LSO (Lightning and Sprite Observations), embarquée à bord de la station spatiale internationale de 2001 à 2004 [4]. Ce concept sera utilisé par le satellite TARANIS que nous avons proposé à la suite de LSO.

TARANIS (figure 2) est une mission de microsatellite du programme Myriades du CNES, menée par trois laboratoires CNRS, le CEA, et différents instituts européens, japonais, et américains. TARANIS fournira, pour la première fois, des mesures simultanées des différents types de phénomènes transitoires de l'environnement

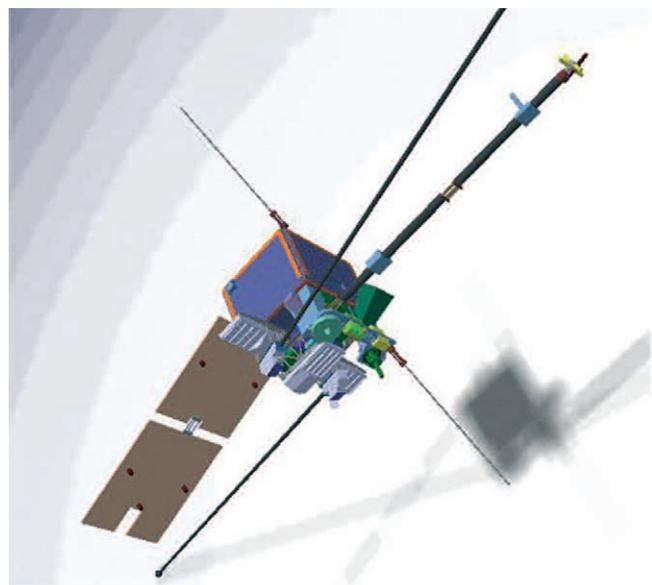


**Figure 1**  
Mécanismes à l'origine des TLEs et des TGFs. Les champs électriques quasi statiques sont à l'origine des halos diffus souvent associés aux sprites, alors que les TGFs pourraient être produits par une avalanche d'électrons relativistes déclenchée par le rayonnement cosmique [1].

de la terre, et permettra de déterminer les échanges d'énergie entre les différentes couches de l'atmosphère, l'ionosphère, et la magnétosphère. La charge utile se compose de :

- 2 micro caméras et 4 photomètres (de l'UV au proche infrarouge) observant les éclairs et les différentes classes de TLEs au nadir. Les observations des photomètres, dans différentes longueurs d'onde, permettront de déterminer certains paramètres, comme le chauffage électronique ;
- 3 détecteurs X et gamma (20 keV à 10 MeV), qui caractériseront les TGFs et détermineront leur énergie maximale et leur altitude, à partir des parties basses et intermédiaires des spectres en énergie ;
- 2 détecteurs d'électrons de haute énergie (70 keV à 4 MeV), qui détecteront le faisceau d'électrons de haute énergie formé par le phénomène d'avalanche d'électrons relativistes, ainsi que les précipitations d'électrons produites par l'interaction des ondes VLF des éclairs avec la magnétosphère ;
- 3 antennes électriques et magnétiques, couvrant une très large gamme de fréquence (du continu à 30 MHz), qui caractériseront les émissions électriques et magnétiques associées, et caractériseront l'éclair parent des TLEs et des TGFs.

Des statistiques seront effectuées pour identifier la distribution géographique et les occurrences des différents types d'émissions transitoires, ainsi que les conditions favorisant l'apparition de ces phénomènes : activité volcanique, rayonnement cosmique, etc. Les mesures seront effectuées en corrélation avec des observations au sol et par ballon, qui permettront d'étudier les effets sur l'environnement.



**Figure 2**  
Le microsatellite TARANIS.

### Les expériences au sol associées

Les premières observations de sprites en Europe ont été effectuées depuis le Pic du Midi en 2000. Le CEA - DAM a participé, entre 2003 et 2005, aux campagnes d'observation de sprites dans le cadre du projet européen CAL (Coupling of Atmospheric Layers). En 2003, il a effectué les premières observations conjuguées de sprites par caméra, et d'infrasons par microbaromètres [5]. Lors de la campagne de 2005, la source des ondes infrasonores – liée à des sprites situés à moins de 150 km des capteurs – a pu être décrite dans les trois dimensions de l'espace, à partir de l'analyse des signaux infrasonores d'un mini-réseau de capteurs. En 2004, des mesures du champ électrique ont fait apparaître que l'amplitude du champ électrique des ondes radio, dans le domaine des moyennes fréquences (300 kHz à 3 MHz), s'atténue fortement juste après des éclairs d'orage (figure 3) [6]. Cette atténuation dure quelques millisecondes, et peut atteindre jusqu'à 30 dB. Une étude statistique de ce phénomène a été réalisée sur 4 000 événements. Nous avons pu révéler que l'atténuation crête et la durée de l'atténuation sont directement reliées à l'intensité de l'éclair, liant ainsi, de manière certaine, les deux phénomènes. De plus, nous avons pu établir que les éclairs perturbent les ondes radio jusqu'à 250 km autour d'eux.

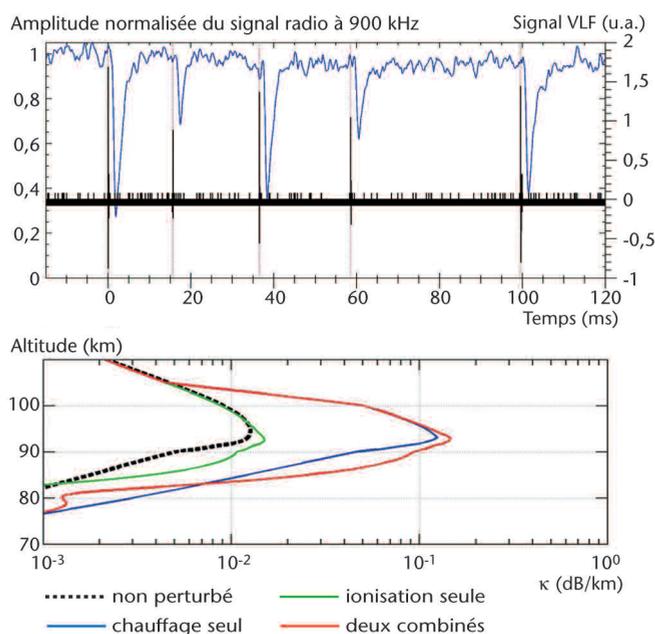


Figure 3

**En haut :** Émissions transitoires VLF d'éclairs successifs (noir), comparées à l'absorption des ondes radio à 900 kHz (bleu). Une atténuation importante se produit après chaque éclair indiqué.

**En bas :** Profil du coefficient d'absorption  $\kappa$  d'une onde radio de moyenne fréquence, pour différentes hypothèses théoriques. Le profil "non perturbé" correspond à une situation ionosphérique normale. Les trois autres cas montrent l'effet de l'ionisation et/ou du chauffage supplémentaire produit par l'interaction de l'onde électrique de l'éclair avec la basse ionosphère.

Nous avons cherché à comprendre l'origine de ces atténuations. Les éclairs génèrent une impulsion électromagnétique (IEM), qui, en se propageant dans les basses couches de l'ionosphère (80 à 100 km d'altitude), produit plus d'ionisation et chauffe les électrons. Nous avons examiné lequel de ces deux mécanismes était responsable de l'atténuation observée. Nous avons calculé le coefficient d'absorption d'une onde radio, en considérant une ionosphère standard modifiée, soit par l'ionisation, soit par le chauffage électronique, soit par les deux. L'absorption s'explique, essentiellement, par le chauffage électronique. Ceci est confirmé par un temps de retour à la normale du chauffage des électrons compatible avec la durée de l'atténuation observée, alors que celui de l'ionisation est mille fois plus long.

Les elves et ces atténuations radio sont la double signature de l'effet du champ électrique des éclairs sur la basse ionosphère. L'incidence de ce phénomène n'est pas négligeable si nous considérons l'étendue des zones orageuses, de l'ordre de  $10^5$  à  $10^6$  km<sup>2</sup>. Avec une activité moyenne d'une dizaine d'éclairs par seconde, l'interaction de l'IEM des éclairs avec la basse ionosphère est la plus importante source d'ionisation de l'ionosphère nocturne à basse altitude.

### Références

- [1] E. BLANC, F. LEFEUVRE, R. ROUSSEL-DUPRÉ, J.-A. SAUVAUD, "TARANIS: a microsatellite project dedicated to the study of impulsive transfers", *Advances in Space Research*, **40**, p. 1268-1275 (2007).
- [2] W. A. LYONS, dans "Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges", M. FULLEKRUG et Al. Ed., Springer (2006).
- [3] D. M. SMITH, L. I. LOPEZ, R. P. LIN, C. BARRINGTON-LEIGH, "Terrestrial gamma ray-flashes observed up to 20 MeV", *Science*, **307**, p. 1085-1088 (2005).
- [4] E. BLANC, T. FARGES et Al., "Nadir observations of sprites from the International Space Station", *J. Geophys. Res.*, **109**, A02306 (2004).
- [5] T. FARGES, E. BLANC, A. LEPICHON, T. NEUBERT, T. H. ALLIN, "Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite 2003 campaign", *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01813 (2005).
- [6] T. FARGES, E. BLANC, M. TANGUY, "Experimental evidence of D region heating by lightning-induced electromagnetic pulses on MF radio links", *J. Geophys. Res.*, **112**, A10302 (2007).