

# Phénomènes lumineux transitoires au-dessus des orages : observation et conditions de production

## Résumé

Les phénomènes lumineux transitoires, TLE (de l'anglais « Transient Luminous Events »), constituent un ensemble de phénomènes lumineux qui se produisent au-dessus de certains orages jusqu'à la base de l'ionosphère pour les plus élevés. À l'échelle mondiale, les plus fréquents sont les elves, sortes d'anneaux lumineux de 100 à 300 km de diamètre à 90 km d'altitude, qui se produisent plutôt au-dessus des orages océaniques et côtiers. Les sprites sont les plus couramment observés avec des caméras au sol, au-dessus des régions stratiformes des orages de moyenne échelle. De forme, de structure et de taille diverses, ils génèrent des émissions de lumière nocturne spectaculaires. Ils sont produits quelques millisecondes après un éclair nuage-sol, positif dans la plupart des cas ou négatif dans quelques rares conditions. À nos latitudes, un orage peut en produire plusieurs dizaines, plutôt en fin de vie lorsque les éclairs sont moins fréquents, mais pas moins puissants. Cet article revient sur la découverte des TLE, aborde leur description scientifique et détaille les mécanismes physiques qui les génèrent. Il donne aussi des conseils pratiques pour les observer et les enregistrer.

## Abstract

### Transient Luminous Events (TLEs) above thunderstorms: observation and conditions of production

TLEs (Transient Luminous Events) are luminous events occurring above thunderstorms up to the base of the ionosphere. At a global scale, the most frequent are the elves, luminous ...

Serge Soula<sup>(1,2)</sup> et Oscar Van der Velde<sup>(3)</sup>

(1) Université de Toulouse, UPS, Laboratoire d'aérodynamique (LA) 14, avenue Édouard-Belin - 31400 Toulouse, France

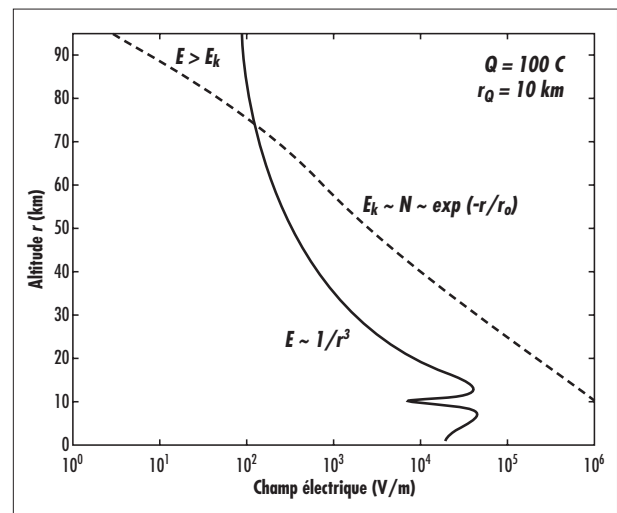
(2) CNRS, Laboratoire d'aérodynamique (LA) 14, avenue Édouard Belin, F-31400 Toulouse, France

(3) Département d'ingénierie électrique - Université technologique de Catalogne, Espagne

Les premiers témoignages de phénomènes lumineux inexpliqués, observés à l'œil nu au-dessus des orages, se trouvent dans la littérature dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Vaughan et Vonnegut (1989) ont, par exemple, réalisé une compilation de tels témoignages pouvant être crédibles. C'est finalement le 6 juillet 1989 qui va marquer le début d'une longue série d'observations de ces phénomènes lumineux, que l'on va appeler plus tard TLE, de l'expression Transient Luminous Event. Cette nuit-là, une équipe de l'université du Minnesota, conduite par le professeur Winckler, testait une caméra noir et blanc très sensible, pour des prises de vue d'un sondage par fusée. Ils ont enregistré par hasard un « éclair » double de très faible durée (moins de 30 ms), qui allait s'avérer provenir d'au-dessus d'un orage lointain dans la région du lac Supérieur. La figure 1 montre le cliché de cette observation qui a été publié l'année suivante dans Franz et al. (1990). Il n'en fallait pas beaucoup plus pour valider la théorie du physicien écossais C. T. R. Wilson, prix Nobel de physique en 1927, pour ses travaux



Figure 2 - Allure des profils verticaux du champ électrique  $E$  du nuage chargé et du champ électrique  $E_k$  nécessaire à une décharge électrique (Wilson, 1925). À une certaine altitude (ici entre 70 et 75 km), le champ produit par le nuage peut être suffisant pour produire une décharge.



... rings of several tens of km in diameter at a 90 km altitude. They generally occur above oceanic and coastal thunderstorms. Sprites are the most often observed with cameras at the ground, occurring above stratiform areas of Mesoscale Convective Systems storms. With varied shape, structure and size, they generate spectacular nocturnal light emissions. They are produced some milliseconds after a cloud-to-ground lightning flash, positive in most cases and negative in some rare cases. At our latitude, a storm can produce several tens of them, rather at the end of its lifetime when the flashes are not frequent, but powerful. This article goes back over the discovery of TLEs, moves to their scientific description and details the physics behind their generation. Practical advises are given to observing and recording them as well.

sur la visualisation des trajectoires de particules ionisantes dans une chambre de condensation (chambre de Wilson). Celui-ci avait émis la possibilité de décharges électriques au-dessus des orages à des altitudes élevées grâce au champ électrique produit juste après un éclair nuage-sol qui neutralise suffisamment de charge d'un seul signe dans le nuage d'orage. Comme le montre la figure 2 (d'après Wilson, 1925), à une altitude de l'ordre de 70 km, le champ électrique, produit par le nuage après l'éclair, pourrait dépasser le champ seuil de déclenchement d'une décharge (champ disruptif) qui est proportionnel à la densité de l'air. Wilson avait même déclaré qu'il aurait aperçu ce genre de « flash » diffus, en forme « d'éventail » et de couleur verdâtre au-dessus d'orages assez éloignés pour être sous l'horizon (dans Lyons, 1994).

## La grande famille des TLE

Le terme TLE est maintenant évoqué couramment dans la communauté scientifique en physique de l'environnement. Il comprend toute une gamme de phénomènes lumineux qui se produisent au-dessus des orages jusqu'à une altitude correspondant à la base de l'ionosphère (sur la formation des orages voir l'encadré « Éclairs et orages »).

L'ionosphère est un ensemble de couches ionisées dont la base est à 60 km d'altitude environ le jour et à 90 km environ la nuit, et dont le sommet est à 800 km. Ces couches constituent un « plafond » pour les décharges électriques. Le schéma de la figure 3 regroupe les principaux types de TLE, placés dans leur environnement en fonction des connaissances actuelles sur les orages qui les produisent. La première observation évoquée plus haut était un cas de « red sprite », le TLE le plus souvent observé depuis le sol dans toutes les régions du monde. Ce nom de sprite (sylphe en français) lui a été donné en référence à un petit personnage mythologique qui disparaît lorsqu'on lui prête attention. C'est le TLE qui a fait le plus l'objet d'études et d'articles dans la littérature. On trouve les sprites sous différentes formes qui sont à l'origine de leur classification en « colonne », « carotte », « ange » ou

## Éclairs et orages

L'orage est directement associé à un nuage de type cumulonimbus générateur de décharges électriques que l'on appelle éclairs (Soula, 2003). Les éclairs découlent d'une accumulation de charges électriques portées par certains hydrométéores (cristaux de glace, graupels ou grésil, gouttes, etc.) en concentration suffisante dans les régions du nuage où elles sont rassemblées. Le processus le plus probable à l'origine de ces charges est l'effet thermoélectrique qui se produit lorsque des particules glacées, en général des cristaux de glace et des graupels, de température différente, entrent en contact et se séparent dans le milieu nuageux. Le signe et la quantité de la charge échangée dépendent d'un certain nombre de paramètres comme la différence de température entre les particules, la température ambiante, la quantité d'eau liquide... Ensuite, ces particules vont se rassembler dans certaines régions du nuage pour former des poches ou des couches de charge. La répartition classique présente une région de charge négative dans la partie inférieure du nuage et une positive dans sa partie supérieure. Mais quand la durée de vie de l'orage est longue et quand la structure de l'orage est complexe, il peut y avoir plusieurs couches ou plusieurs régions de charge. Les premiers éclairs produits par un orage sont en général intranuage (IC comme Intracloud). Ils déchargent deux régions chargées de signe opposé par un ensemble de processus de propagation de filaments ionisés (**streamer**) qui constitue un canal conducteur. Les éclairs nuage-sol (CG comme Cloud-to-Ground) se produisent entre une zone chargée du nuage et le sol et ils ont un signe (+ ou -), celui de la charge nuageuse neutralisée. Les éclairs nuage-sol sont presque tous descendants dans la mesure où leur première phase (**leader** ou traceur) démarre dans le nuage. Lorsque ce leader approche du sol, un leader de connexion part du sol pour faire une jonction qui entraîne l'écoulement d'une forte charge que l'on appelle **arc-en-retour**. Le maximum d'intensité électrique atteint lors de cet arc-en-retour constitue une caractéristique appelée pic de courant qui est en moyenne plus élevée pour les éclairs positifs. Pour un même éclair nuage-sol, plusieurs arcs-en-retour peuvent se produire en quelques dixièmes de seconde et leur nombre est une autre caractéristique de l'éclair : la multiplicité. Elle est en moyenne plus élevée pour les éclairs négatifs.

Il existe plusieurs types d'orages caractérisés par des tailles, des structures et des durées différentes. Ainsi, les orages monocellulaires sont constitués d'une cellule convective avec une durée de moins d'une heure et une taille horizontale d'environ 10 km. Les orages supercellulaires durent quelques heures et sont caractérisés par de très fortes ascendances et une large extension verticale. Les orages multicellulaires sont des systèmes organisés avec des cellules à plusieurs stades de développement qui se succèdent pendant plusieurs heures. Les systèmes convectifs de moyenne échelle (MCS), parmi lesquels on trouve les lignes de grain (plusieurs cellules qui se regroupent et se déplacent avec le vent moyen) et les complexes convectifs de moyenne échelle (MCC) dont la surface est supérieure à 150 000 km<sup>2</sup>, présentent des zones stratiformes caractérisées par des taux de pluie assez faibles. Les zones convectives et stratiformes des orages sont le siège d'activité d'éclairs dont les caractéristiques sont différentes. Ainsi, les régions convectives sont plutôt marquées par des éclairs intranuage et des éclairs nuage-sol négatifs alors que les régions stratiformes sont plutôt marquées par des éclairs nuage-sol positifs, mais avec des taux plus faibles.



Éclair complexe avec coup au sol et nombreuses propagations horizontales, au Kansas (États-Unis), le 26 mai 2006. (© O. Van der Velde)

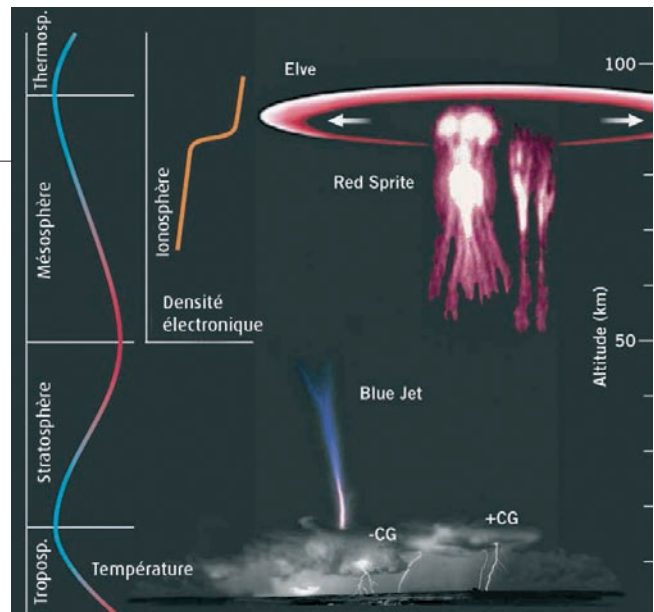
Figure 3 - Schéma des différents TLE (elve, sprite, jet) et de leur situation en fonction de l'altitude au-dessus de l'orage qui peut les produire. Le profil de densité électronique (courbe orange) est schématisé pour localiser les couches de l'ionosphère, tandis que celui de la température permet de situer les différentes couches de l'atmosphère. -CG et +CG signifient éclair nuage-sol négatif et positif, respectivement.

encore « méduse ». La figure 4 montre une sélection d'exemples typiques de chaque forme, tirés d'observations des campagnes EuroSprite en France et décrits de façon plus détaillée dans le paragraphe suivant. Ils sont plutôt associés à des systèmes convectifs de moyenne échelle, MCS pour Mesoscale Convective System (Lyons, 1994). Leur très grande majorité a la particularité d'être produite après un éclair nuage-sol positif avec un délai de quelques ms à quelques dizaines de ms (Boccippio et al., 1995). Ce délai est plus ou moins long selon le type de sprite comme le montre Van der Velde et al. (2006) en s'appuyant sur des observations faites en France. Les éclairs nuage-sol positifs « parents » ont des pics de courant en moyenne plus élevés que les autres, mais peuvent aussi en avoir de très faibles, ce qui montre que ce n'est pas un critère déterminant. En revanche, ces éclairs « parents » induisent des variations de moment de charge relativement forts. Cette variation est le produit de la charge neutralisée par l'altitude à laquelle elle se trouvait dans le nuage. La probabilité de production d'un sprite devient forte pour des valeurs de ces variations de moment de charge supérieures à 600 C.km (Cummer et Lyons, 2005).

La couleur dominante des sprites est le rouge et la terminologie utilise indifféremment « sprite » ou « red sprite ». Cela vient des transitions électroniques mises en jeu dans les molécules d'air frappées par les électrons accélérés par les conditions électriques qui apparaissent soudain à cette altitude (70 km environ pour l'altitude de l'initiation du phénomène) après un éclair positif puissant. Même si le rouge est la couleur dominante, d'autres couleurs (bleu) peuvent être présentes dans la partie la plus basse du phénomène.

Les « **blue jets** » ont été découverts un peu plus tard, en 1994, par une équipe de l'université d'Alaska, à partir

d'observations aéroportées dans l'État de l'Arkansas aux États-Unis (Wescott et al. 1995). Ils se développent vers le haut à partir de sommets élevés de nuage d'orage, à une vitesse d'environ 100 km.s<sup>-1</sup> jusqu'à 35-40 km et se présentent sous la forme de décharges lumineuses coniques bleues. Certains ont un tel développement vertical qu'ils ont pris le nom de « **jets géants** » ; ils ont été découverts en 2002 pendant une campagne à Porto Rico (Pasko et al., 2002). Ces jets géants relient électriquement le sommet du nuage d'orage à la couche inférieure E de l'ionosphère qui se trouve la nuit à une altitude d'environ 90 km. Un autre type de décharge bleue issue du sommet de l'orage, qui a au contraire un faible développement vertical, jusqu'à environ 25 km, est appelé « **blue starter** » (Wescott et al., 1996). Les jets peuvent être produits par des orages de plusieurs types, supercellules ou lignes de grain, mais avec une altitude élevée du sommet nuageux et une forte activité d'éclair (Wescott et al., 1996 ; Van der Velde et al., 2007). Un autre type de jet découvert à la fin des années 1990 a été appelé « **palm tree** » (ou **troll**) en raison de sa forme et de sa propagation vers le haut. Il connecte les branches descendantes de sprites de grande taille (Heavner, 2000). Comparés aux sprites, les jets sont plus bleus car le processus de décharge est différent et se produit à une altitude plus basse.



Les observations au moyen d'engins spatiaux ont permis de découvrir les « **elves** », acronyme de « Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources » (et parfois traduits « elfes » en français). Les elves sont des sortes de grands anneaux lumineux (100-300 km) à la base de l'ionosphère, plus faciles à observer depuis l'espace aux limbes de la Terre (Boeck et al., 1992). Ils sont produits après des éclairs nuage-sol de forte amplitude et des deux signes, avec un délai très court (150 μs environ) et sont très brefs (Fukunishi et al., 1996). Ils sont dus à des impulsions électromagnétiques générées par l'arc-en-retour de l'éclair qui illumine la base de l'ionosphère par excitation électronique (Inan et al., 1997). Les elves sont aussi des excitations de molécules de gaz avec des émissions dans le rouge et les UV lointains.

Les observations récentes par l'expérience Isual sur le satellite taiwanais *Formosat* ont permis de cartographier la probabilité d'apparition de certains de ces TLE à l'échelle de la Terre (Su et al., 2007). On voit, d'après



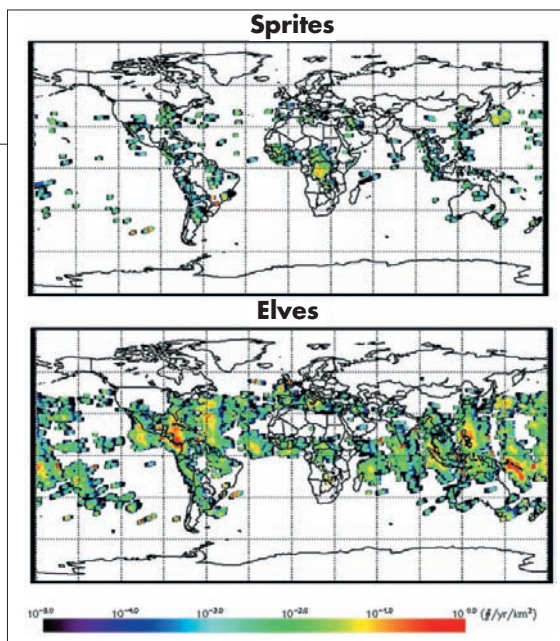
Figure 4 - Galerie photo de quelques sprites de plusieurs types (colonne, carotte, ange, méduse), halos et elves photographiés avec une caméra Watec 902H du Laboratoire d'aérologie.

Figure 5 - Répartition de la densité de sprites et d'elves vus par le capteur spatial Isual sur le satellite *Formosat*, entre juillet 2004 et décembre 2006. (D'après Su et al., 2007)

la figure 5, que les sprites sont surtout produits dans les zones à forte activité orageuse (zones continentales et tropicales) et qu'une grande majorité des elves est produite sur les océans ou près des côtes. Elles ont également permis de montrer que les elves sont les plus fréquents puisque 80 % des TLE détectés correspondent à cette catégorie.

## L'observation des TLE en France

La première campagne d'observation de TLE en France a été conduite pendant l'été 2000 avec une caméra installée au pic du Midi à 2 877 m (Neubert et al., 2001). Les quarante sprites de formes diverses enregistrés pendant trois nuits de cet été-là ont montré que ce phénomène était courant dans les systèmes orageux en Europe. Toutefois, les orages ayant produit les sprites en question étaient moins intenses et de taille plus réduite que ceux observés dans les grandes plaines aux États-Unis. Trente-huit de ces quarante sprites étaient associés à un éclair nuage-sol positif. Plus récemment, le projet CAL (Coupling of Atmospheric Layers) a associé plusieurs équipes européennes afin d'explorer plus particulièrement certains volets de la recherche sur les sprites (Neubert et al., 2005). Sur la base d'observations à une ou plusieurs caméras au cours des étés 2003 à 2007, CAL a permis de mener des travaux sur la modélisation de ce type de décharge d'altitude, sur les caractéristiques des orages générateurs, sur leurs conditions de production, sur l'estimation de leur taux de production à l'échelle globale, sur leurs possibles actions dans la chimie de l'atmosphère et dans l'équilibre électrique de l'environnement terrestre. Ainsi, au cours des mois de juillet et août 2003, une centaine de sprites étaient observés avec une caméra au pic du Midi. Puis, en 2005, avec une deuxième caméra au puy de Dôme (1 645 m), soixante-cinq sprites étaient détectés de juillet à octobre. En 2006, la deuxième caméra était installée au mont Aigoual (1 565 m) et, de juillet à novembre cette fois, quatre-vingt-



quatre observations de sprites étaient réalisées. Au cours de la campagne 2007, quatre caméras étaient utilisées et de juillet à janvier 2008, un total de 355 sprites et 40 elves était récolté. Quarante-deux de ces événements étaient vus avec deux caméras. 65 % de ces TLE et la totalité des elves étaient observés d'octobre à janvier, dont une grande majorité au-dessus d'orages dans le bassin méditerranéen. Ces fortes proportions sont expliquées par de bonnes conditions d'observation dans le sud de la France où les caméras étaient localisées et par une fréquence importante des orages sur la Méditerranée dans la période automne-hiver. Un grand nombre d'images de tous ces TLE est visible sur le site <http://eurosprite.blogspot.com/>.

Une galerie photo de TLE est présentée sur la figure 4. On y voit notamment la plupart des types de sprite recensés à ce jour : de gauche à droite et de haut en bas, un groupe de colonnes à géométrie apparemment circulaire, un autre groupe de colonnes, un groupe de carottes, deux anges, un groupe de colonnes et une méduse, un groupe de colonnes et de carottes, un groupe de carottes avec un halo, et enfin un elve avec des sprites. Un cas de sprite (le deuxième en bas en partant de la gauche) a pu être photographié en couleur par Oscar Van der Velde le 11 septembre 2006 à 21 h 10 min 26 s TU, depuis le site du mont Aigoual. Le cliché a été pris avec un appareil photo numérique Canon EOS 5D équipé d'un objectif 50 mm d'ouverture  $f/1.8$ , avec un temps de pause de 4 secondes et une sensibilité de 1600 ISO. La figure 6 montre cette

observation inédite où la couleur rouge des sprites est bien mise en évidence. L'orage qui l'avait généré se trouvait dans les Landes, la distance au sprite était donc d'environ 300 km. Comme l'ouverture angulaire de la caméra utilisée pour le cliché de la figure 4 était de  $23^\circ$ , l'ensemble du phénomène s'étalait sur une largeur d'environ 80 km. Au cours de la même campagne, un sprite de type carotte était vu simultanément par les caméras du pic du Midi et du mont Aigoual le 26 juillet à 01 h 13 min 17 s TU. La figure 7 montre le schéma de la triangulation élaborée à partir de ces deux clichés, la localisation de l'éclair nuage-sol positif qui en a été le générateur et le champ de réflectivité radar dans le système orageux qui en était le siège. L'éclair « parent » était produit 90 ms avant le sprite et avait un pic de courant de 51 kA. C'est donc dans ce cas un délai assez long, ce qui est une caractéristique des sprites de type « carotte », comme l'ont montré Van der Velde et al. (2006). Le sprite était à 280 km de la caméra du mont Aigoual et à 330 km de celle du pic du Midi. Les dimensions de cette « carotte » ont été déterminées sur les parties lumineuses réparties entre 49 et 81 km d'altitude. Sa taille horizontale (environ 6 km) se situe dans les valeurs classiques données pour les éléments de sprites (Gerken et al., 2000).

## Les orages producteurs de sprites

Les campagnes d'observation en France ont permis de caractériser les orages producteurs de sprites en termes de structure et d'activité d'éclairs. En utilisant les données radar pour les cas d'orages qui étaient dans la zone de couverture du réseau Aramis<sup>(1)</sup> (Parent du Chatelet, 2003) et celles du réseau Météorage de détection des

(1) Aramis, Application radar à la météorologie infrasyntoptique, est le nom du réseau français de radars météorologiques pour la surveillance des précipitations.



Figure 6 - Photo de sprite obtenue par Oscar Van der Velde le 11 septembre 2006 au mont Aigoual à 21 h 10 TU, dans la direction d'un orage localisé dans les Landes. L'appareil utilisé en pause pour cette prise de vue était un Canon EOS 5D de sensibilité 1600 ISO avec un objectif de focale 50 mm et d'ouverture f/1,8. (© O. Van der Velde)

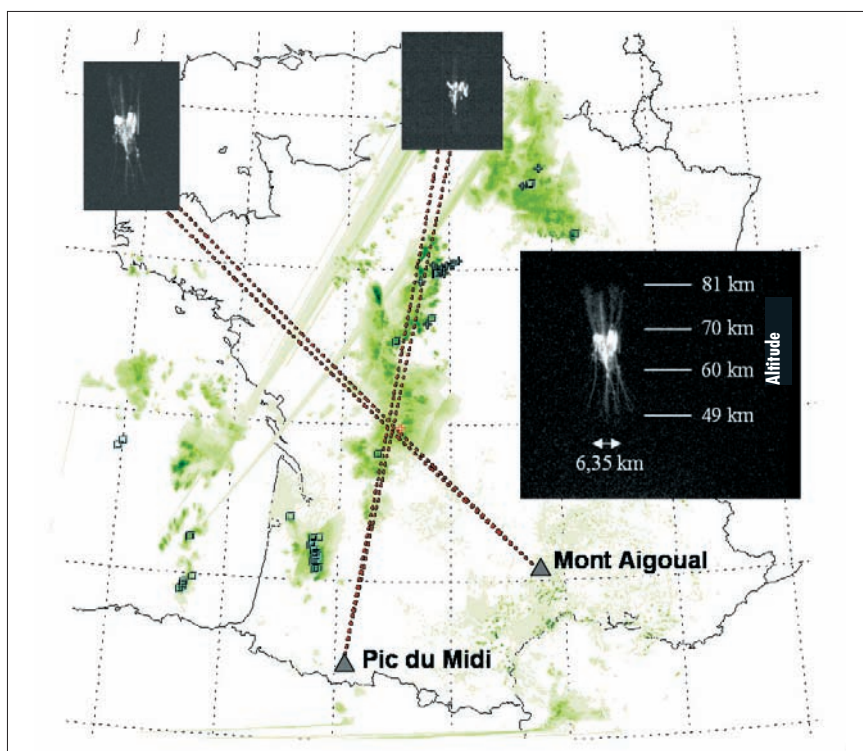


Figure 7 - Triangulation d'un sprite vu par deux caméras, l'une au pic du Midi (2 877 m) et l'autre au mont Aigoual (1 565 m). L'orage qui a produit ce sprite se trouvait dans la région de Limoges comme l'indique la réflectivité radar. Le symbole + en rouge indique la localisation de l'éclair nuage-sol positif à l'origine du sprite. La distance permet d'évaluer les dimensions et l'altitude du phénomène lumineux.

éclairs nuage-sol, nous avons analysé statistiquement le taux de pluie dans la région des éclairs nuage-sol. Ainsi, nous avons calculé le taux de pluie moyen dans un rayon de 10 km autour de l'impact de l'éclair au sol, en distinguant les éclairs nuage-sol négatifs, positifs et « parents » (producteurs d'un sprite). Le taux de pluie a été calculé en utilisant la loi Z-R proposée par Marshall et Palmer (1948) :  $Z = 200.R^{1.6}$ , où la réflectivité radar Z est en  $mm^6.m^{-3}$  et le taux de pluie R est en  $mm.hr^{-1}$ . La statistique a porté sur 7 orages et 145 éclairs ayant produit un sprite détecté par une caméra. La figure 8a donne la synthèse des résultats sous forme de distribution du taux de pluie moyen en fonction de l'intensité maximale de l'éclair (ou pic de courant). Les éclairs négatifs sont beaucoup plus nombreux dans la statistique ; ils représentent 85 % des 18 508 éclairs. Pour les deux polarités d'éclairs, mais avec une tendance plus marquée pour les positifs, les plus intenses correspondent à des taux de pluie faibles. En revanche, les éclairs de faible courant peuvent être produits avec tout taux de pluie. Les éclairs « parents » (triangles rouges) sont presque exclusivement positifs – un seul est négatif – et sont presque tous associés à un faible taux de pluie. La figure 8b montre la même distribution mais avec un paramètre caractérisant l'uniformité de la pluie autour des éclairs. Il est calculé en faisant la différence entre les taux de pluie moyens dans les cercles de 10 km et de 5 km autour de l'impact de l'éclair. On y voit une nette tendance des forts éclairs et des éclairs « parents » à se produire dans les régions de taux de pluie uniforme, c'est-à-dire dans les régions stratiformes des orages.

L'étude statistique nous montre que les sprites sont produits la plupart du temps dans des systèmes convectifs de moyenne échelle (MCS) qui possèdent une région stratiforme. L'analyse de l'évolution de l'orage et du taux de production de sprite précise que les sprites sont souvent produits dans une période courte par rapport à la durée de l'orage. La figure 9 illustre un cas particulier d'orage de type MCS qui avait produit 27 sprites la nuit du 20 au 21 juillet 2003 dans le centre de la France. L'orage s'était développé en fin d'après-midi dans une situation météorologique marquée par une forte instabilité sur la France avec un flux de sud-ouest, la présence d'une goutte froide en altitude et une convergence en basse couche. Sur la figure 9, les distributions de la réflectivité radar entre 00 h et 03 h 15 montrent

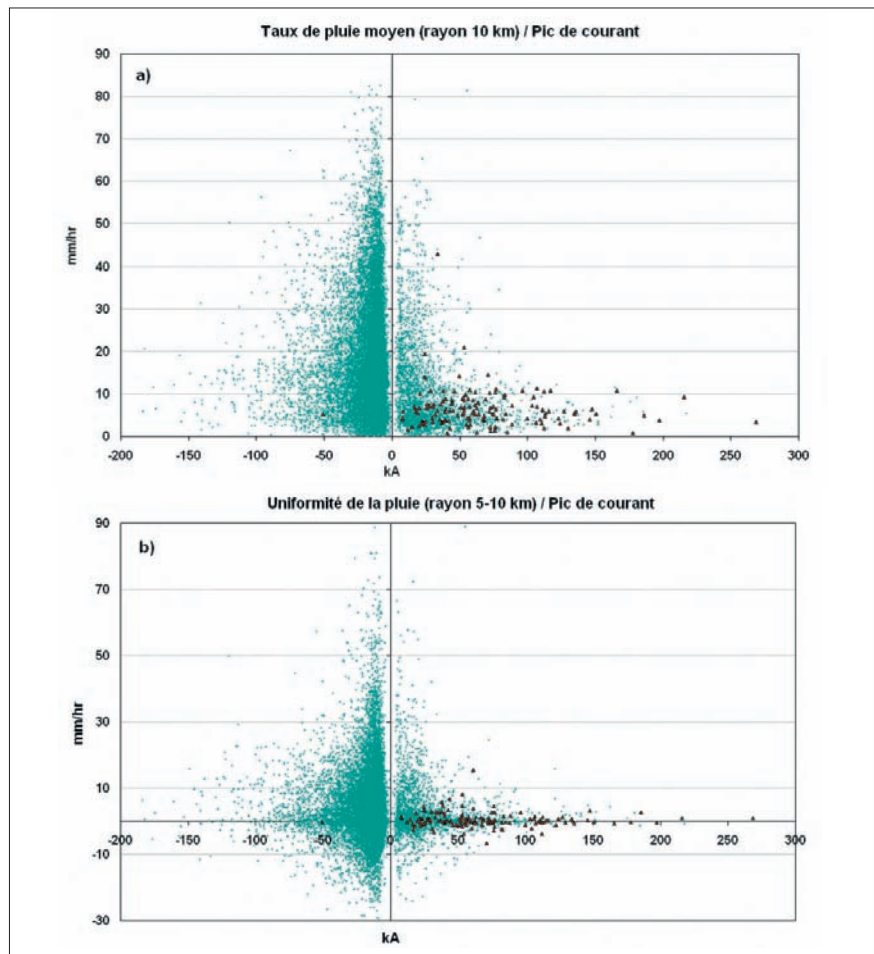
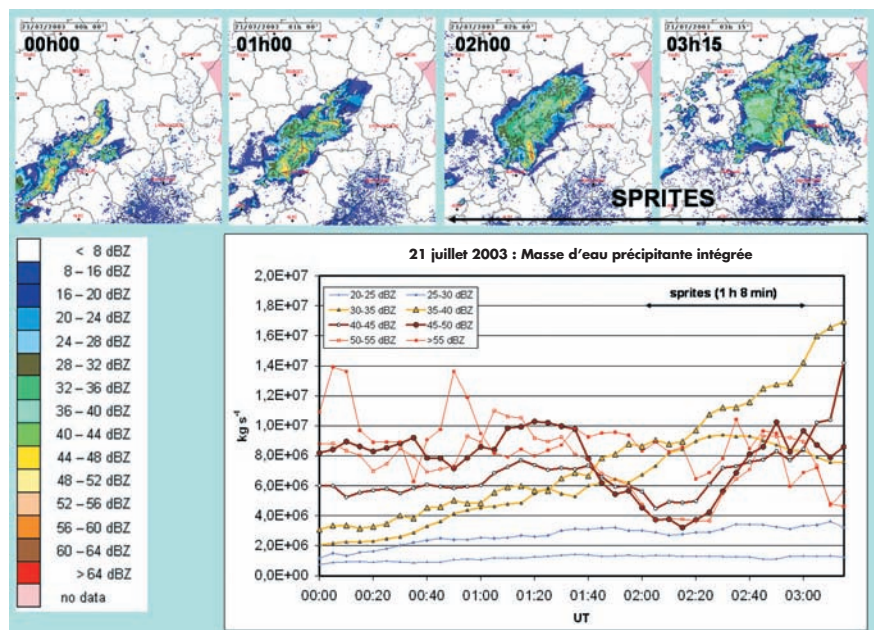


Figure 8  
 a - Distribution du taux de pluie moyen calculé dans un rayon de 10 km autour des points d'impact des éclairs nuage-sol en fonction de leur pic de courant.  
 b - Distribution de la différence de taux de pluie moyen entre deux zones de rayon 10 km et 5 km, respectivement, autour des points d'impact des éclairs nuage-sol en fonction de leur pic de courant. Les triangles rouges représentent les éclairs « parents » de sprites (presque tous positifs).

Figure 9 - Images du haut : évolution de la réflectivité radar vue par le réseau français Aramis dans un orage de type MCS produisant 27 sprites entre 2 h 05 et 3 h 13 TU. Graphe du bas : évolution de la masse d'eau précipitante déduite des images radar par intervalle de valeur de réflectivité radar. On voit un fort développement de la partie stratiforme avec des réflectivités entre 30 et 40 dBZ pendant la période de production des sprites qui dure environ 1 h 08 min.



l'évolution de la structure de l'orage peu avant et pendant la période de production des sprites qui avait duré environ 1 h 08 min. La région représentée sur ces cartes a une dimension de 500 km x 500 km et le MCS qui s'y était développé avait atteint une taille d'environ 250 km x 125 km lorsqu'il commençait à produire des sprites aux alentours de 02 h 05 TU. Le temps entre deux sprites consécutifs était en moyenne de 2 min 37 s avec des valeurs minimales et maximales de 9 s et 6 min 25 s, respectivement, et un écart quadratique moyen de 98 s, ce qui indique une production relativement continue. Le développement de la partie stratiforme de l'orage apparaît avant le début de la production de sprites. Au moment de la production des sprites, la masse d'eau précipitante, calculée par intervalle de valeur de réflectivité radar, montrait un fort développement dans les zones où la réflectivité est comprise entre 30 et 40 dBZ, qui sont des valeurs typiques des régions stratiformes.

## Les éclairs associés aux sprites

Lorsque l'on analyse l'activité d'éclairs nuage-sol tout au long de l'activité d'un orage producteur de sprites, on voit que ces phénomènes lumineux sont consécutifs à une période de forte diminution en éclairs nuage-sol négatifs. En revanche, les positifs ne sont pas affectés par cette diminution et, ainsi, leur proportion devient importante avec des valeurs autour de 50 % au moment des sprites, alors que dans les orages classiques elle n'est que d'environ 10 %. La figure 10 montre l'évolution du nombre d'éclairs nuage-sol produits par l'orage de la figure 9 entre 01 h 00 et 04 h 00 TU. Les 27 sprites produits entre 02 h 05 et 03 h 13 TU sont indiqués par des cercles rouges superposés à la courbe. Le graphe illustre bien la diminution du taux global d'éclairs nuage-sol pendant la production des sprites et le rassemblement de ces sprites sur une période limitée de la vie de l'orage. Les deux graphes de la figure 11 montrent l'évolution du nombre d'éclairs nuage-sol pendant la période de production de sprites pour deux autres événements orageux : a) un orage du 11 septembre 2006 dans la région des Landes (de 20 h 00 à 22 h 00 TU) et b) un orage du 15 novembre 2007 en Méditerranée à l'ouest de la Corse (de 21 h 00 à 1 h 30 TU). On peut voir dans les deux cas qu'un certain nombre de sprites sont

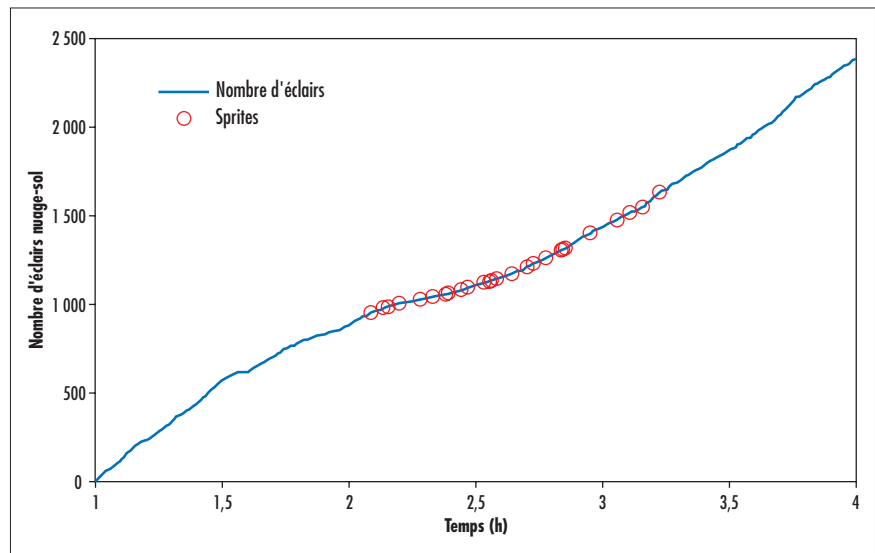
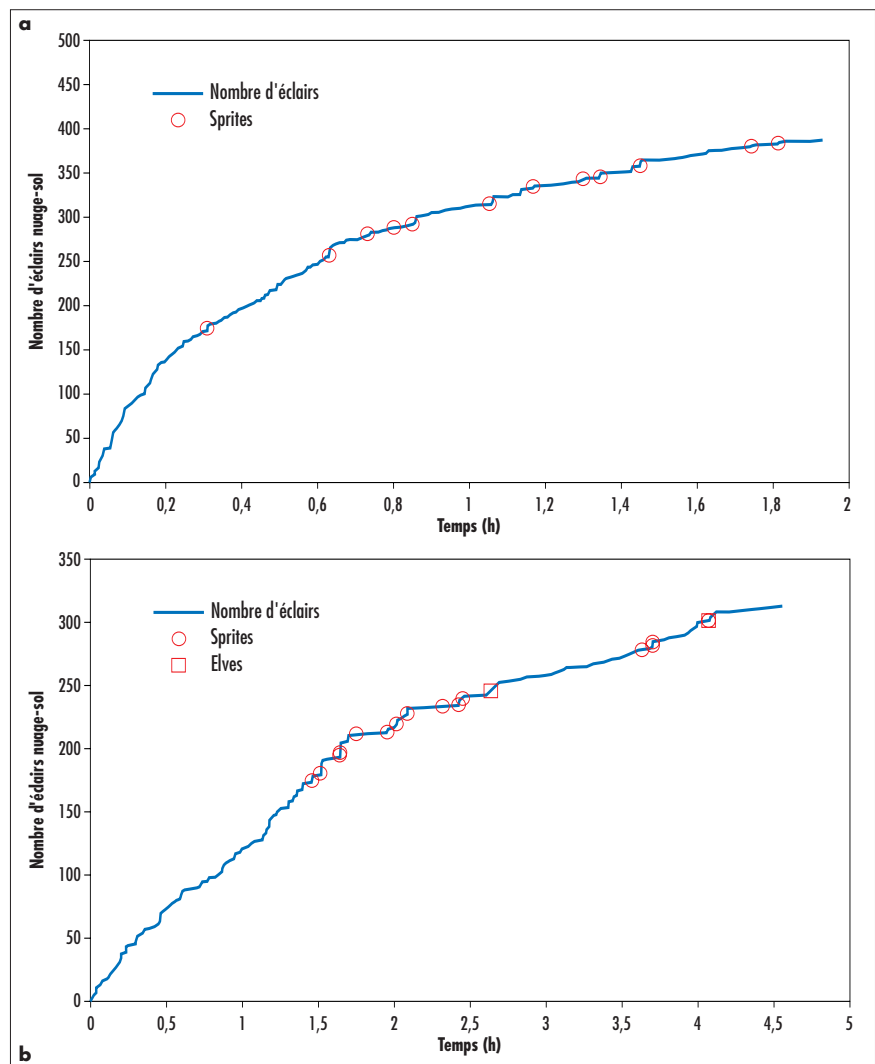


Figure 10 - Évolution du nombre d'éclairs nuage-sol (CG) produits par l'orage du 21 juillet 2003 avec superposition des 27 sprites, entre 1 h 00 et 4 h 00 TU. La production des sprites est associée à une diminution du taux d'éclairs.

Figure 11 - Évolution du nombre d'éclairs nuage-sol (CG) avec superposition des TLE produits pour deux cas d'orage :

a - 11 septembre 2006, entre 20 h 00 TU et 22 h 00 TU avec 13 sprites.

b - 15 novembre 2007, entre 21 h 00 TU et 1 h 30 TU avec 16 sprites et 2 elves. Les sprites sont souvent associés à une séquence d'éclairs pratiquement simultanés marquée par un « saut » du nombre d'éclairs.



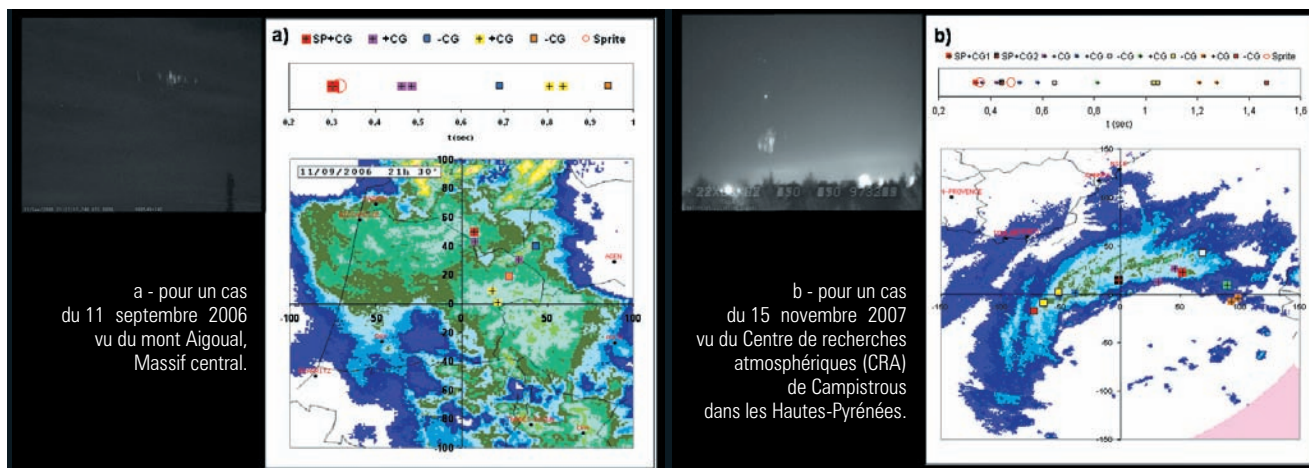


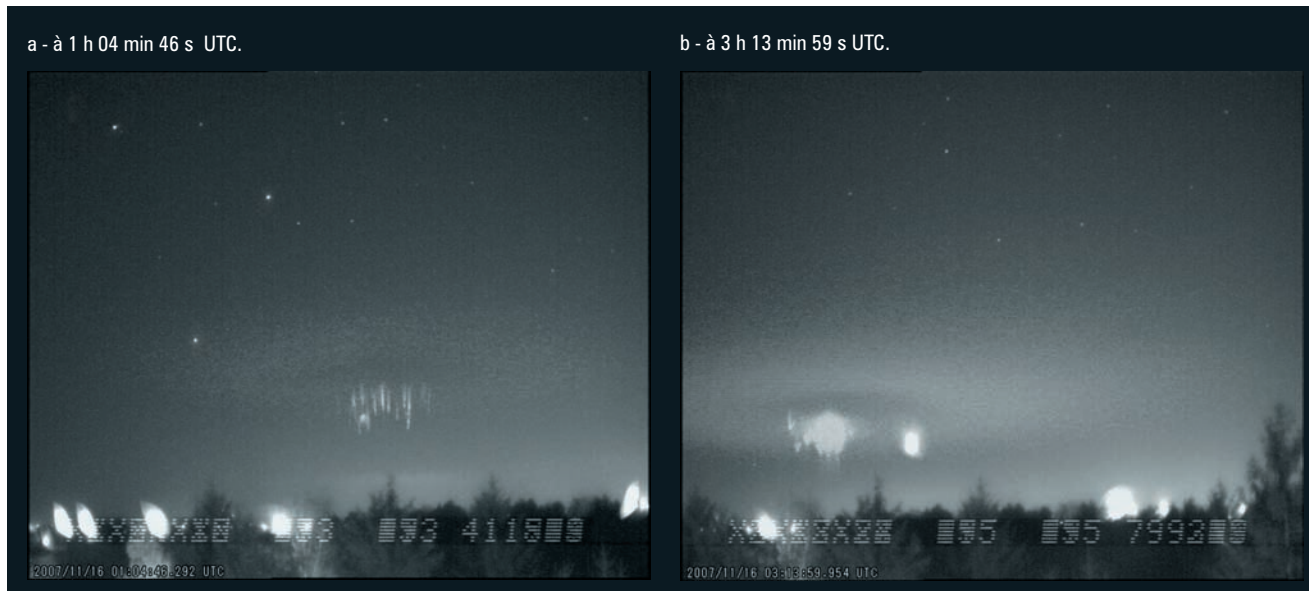
Figure 12 - Champ de réflectivité radar et localisation des impacts d'éclairs nuage-sol associés à des sprites. L'échelle de réflectivité radar est celle de la figure 9. Les photos montrent les sprites. Le graphe supérieur donne chaque fois la répartition des événements sur une échelle de temps en seconde. SP+CG, +CG et -CG distinguent les éclairs nuage-sol « parent » de sprite, positifs et négatifs, respectivement.

associés à des « sauts » de la courbe du cumul d'éclairs, c'est-à-dire à une augmentation brutale et transitoire de leur taux. Bien que le taux global d'éclair soit plus faible dans la période où apparaissent les sprites, les éclairs nuage-sol sont souvent regroupés en séquence au moment d'un sprite. Les « sauts » du nombre d'éclairs apparaissent nettement dans ces deux cas, car le nombre d'éclairs produits y est plus faible que dans le cas de la figure 10. Ces séquences peuvent être des éclairs de type « spider » qui ont des phases « leader » (ou traceur) se propageant horizontalement sur des grandes distances. Ces éclairs se produisent lorsque les régions stratiformes sont suffisamment étendues et électriquement chargées (Mazur et al., 1998). Il existe alors pour le même événement d'éclair plusieurs impacts au sol séparés par des distances qui peuvent atteindre 100 km.

La figure 12 montre la localisation des éclairs de deux cas de séquence associée à un phénomène de sprite dans leur système orageux respectif vu par les radars du réseau Aramis : a) celle de  $t = 1,45$  h (21 h 27 min 17 s TU) dans le cas de la figure 11a avec un sprite et sept éclairs; b) celle de  $t = 1,64$  h (22 h 38 min 38 s TU) dans le cas de la figure 11b avec deux sprites et treize éclairs. Dans les deux cas, les sprites sont consécutifs à un éclair positif : a) avec un délai de 17 ms après un éclair de pic de courant 134,5 kA ; b) avec des délais de 16 ms et 35 ms suite à des éclairs de 124,8 kA et 56,9 kA pour les deux sprites, respectivement. Outre le fait qu'ils sont presque exclusivement positifs, les éclairs « parents » de sprites sont souvent de forte amplitude (figure 8). Alors que pour un orage, l'amplitude moyenne des éclairs positifs est de l'ordre de 30 kA, celle des

éclairs « parents » atteint le double (Soula et al., 2008). Les autres éclairs de la séquence peuvent être positifs ou négatifs et apparaissent dans des délais inférieurs à la seconde. Dans le premier cas (figure 12a), les éclairs sont clairement tous dans une partie limitée de la région stratiforme du système et dans le deuxième cas (figure 12b), ils se répartissent dans toute la zone stratiforme du système. L'étendue de ces éclairs peut évoquer une propagation de type « spider », lorsqu'un leader peut aller connecter une zone chargée éloignée dans la zone stratiforme pour la décharger. Toutefois, l'alternance de polarité de ces éclairs dans une même séquence peut laisser penser qu'il y a une relation de cause à effet entre eux. Tout comme à l'altitude de déclenchement des sprites où une situation de déséquilibre électrique entraîne une décharge, l'éclair initial peut créer aussi dans le

Figure 13 - Deux exemples de phénomènes TLE enregistrés la nuit du 15-16 novembre 2007 au-dessus d'une activité orageuse sur la Méditerranée avec elves et sprites.



nuage des conditions favorables à un nouvel éclair et ainsi de suite jusqu'à un retour à l'état d'équilibre. Dans ce cas, il n'y aurait pas forcément propagation d'un leader entre les différents éclairs détectés, mais un effet à distance sous la forme d'influence quasi électrostatique.

Dans le cas de la nuit du 15 au 16 novembre 2007, illustré sur la figure 12 pour un orage, plusieurs observations d'elves avaient été réalisées. L'activité orageuse étant située au-dessus de la mer, elles confirment la présence de ces TLE au-dessus des orages maritimes comme le montrent les observations satellitaires (figure 5). La figure 13 montre deux exemples de ces observations où en plus de l'elve, un phénomène de sprite était présent. La figure 13a (1 h 04 min 46 s TU) montre un phénomène successif à un éclair nuage-sol positif avec un pic de courant gigantesque de 383,6 kA. Le délai entre l'éclair et le TLE était inférieur à 12 ms. Dans le cas de la figure 13b (3 h 13 min 59 s), l'éclair « parent » avait un pic de courant de 368 kA et l'elve était produit avec un délai inférieur à 3 ms. Le sprite était détecté sur l'image suivante avec un délai inférieur à 23 ms. La durée d'une image étant de 20 ms, il n'est pas possible de connaître exactement ces délais. Sur l'image de la figure 13b, la lune est également visible, en phase premier quartier à cette date. Nous avons là quelques exemples de situations où les conditions requises pour la production des deux phénomènes peuvent être atteintes.

## Les mécanismes physiques à l'origine des sprites et leur modélisation

Les sprites sont des décharges lumineuses qui apparaissent entre 40 et 90 km d'altitude (voir l'encadré « Comment observer facilement des sprites »). Leur structure est en partie liée à une altitude de transition entre une région inférieure très branchée qui correspond à des filaments d'ionisation (**streamer** en anglais) positifs ou négatifs et une région supérieure plus diffuse qui peut former un halo (Pasko et al.,

Figure 14 - Explication du mécanisme de déclenchement d'un sprite basé sur le champ quasi statique produit dans la mésosphère après un éclair nuage-sol positif +CG. (D'après Pasko et al., 1997).

## Comment observer facilement des sprites ?

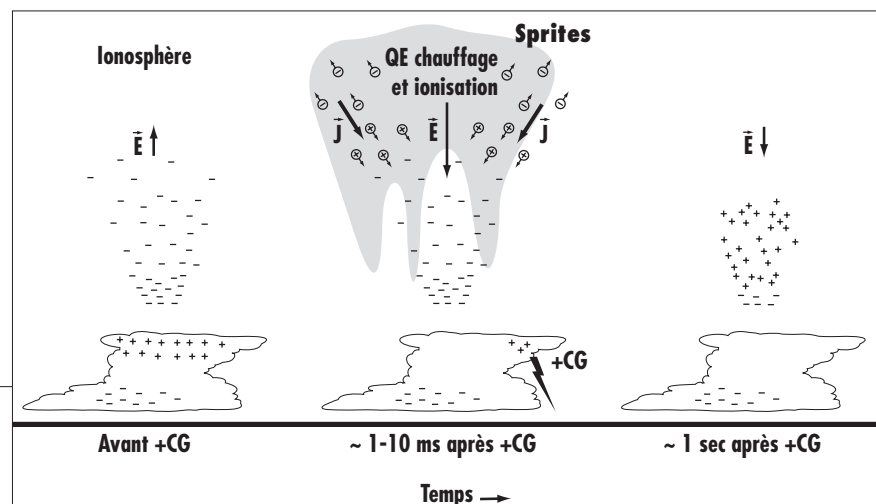
Parmi les TLE, ce sont les sprites qui sont le plus souvent observés depuis le sol. Ces phénomènes se produisant au-dessus des orages, il faut être décalé par rapport au nuage d'orage et bénéficier d'un ciel suffisamment dégagé et aucun obstacle dans sa direction. Étant donné l'altitude du phénomène et sa durée brève, l'observation ne peut se faire que de nuit. De plus, de jour, l'ionosphère présente la couche D à une altitude d'environ 60 km, ce qui perturbe pas mal les conditions requises pour la production d'un sprite et peut donc en empêcher l'existence. Même s'il est difficile d'en voir à l'œil nu, cela est possible si l'on se trouve dans les conditions décrites ci-dessus et à une distance d'environ 200-300 km. Cela dépendra de l'acuité visuelle de l'observateur, de la luminosité ambiante et de la taille du phénomène, mais la durée de la décharge lumineuse est si courte qu'elle ne procure pas de certitude. Pour en montrer la preuve infaillible, il faut utiliser une caméra sensible et un dispositif d'acquisition adapté.

Les caméras le plus souvent utilisées sont des caméras vidéo CCD (de l'anglais Charge-Coupled Device) à haute sensibilité noir et blanc que l'on trouve chez Water, Hitachi... Leur sensibilité est de l'ordre du millilux et la distance de détection est alors en fait limitée par la courbure de la Terre et de l'ordre de 800 km. Pour améliorer cette distance et bénéficier d'un air plus pur, on peut prendre de la hauteur sur un sommet montagneux. Il vaut mieux équiper la caméra d'une optique de focale 12 mm environ pour avoir un champ de vue assez important et viser dans la direction de l'orage, déterminée au moyen de données d'observation météo par exemple, avec une élévation qui dépendra de la distance (environ 10° si l'orage est à 300 km). Pour l'acquisition, on utilise un PC avec carte vidéo et un logiciel de détection qui déclenchera l'enregistrement des événements intéressants seulement. Ces logiciels analysent les images en temps réel, tout en gardant en mémoire tampon une série d'images. Lorsqu'une variation de luminosité suffisante est détectée entre deux images successives, un film de 1 à 2 secondes est enregistré. Sonotaco propose par exemple un logiciel qui a cette fonction [[http://sonotaco.com/e\\_index.html](http://sonotaco.com/e_index.html)].

Si l'on veut connaître le temps exact de l'événement pour le comparer à d'autres données, on peut utiliser un système d'intégration sur les images, du temps fourni par un GPS par exemple. Cet article décrit le type d'orage qui a des chances, et à quel moment, de produire des sprites. Il faut donc s'armer de patience et partir en chasse à la nuit tombée en visant vers les belles enclumes repérées sur les cartes météo pour peu que l'on ait un œil averti : les premières prises ne tardent pas.

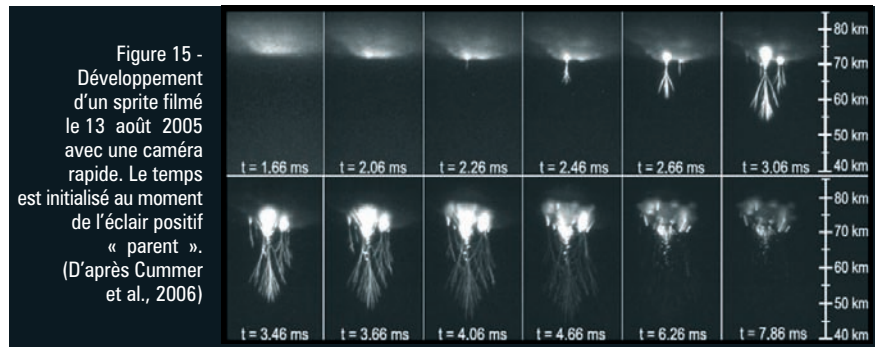
1998). La décharge est produite lorsque les conditions de rupture diélectrique sont atteintes localement, c'est-à-dire lorsque le champ électrique est suffisamment intense pour accélérer les particules chargées qui vont produire une ionisation de l'air. Cette situation se produit à haute altitude, dans la mésosphère à 75 km environ après un éclair nuage-sol positif qui modifie brutalement les conditions électriques au-dessus de l'orage, comme le montre la figure 14. En effet, d'après la figure 2,

le seuil disruptif de l'air baisse avec l'altitude à cause de la diminution de pression. Si la quantité et l'altitude de la charge positive neutralisée par cet éclair sont élevées, la modification en sera d'autant plus importante, d'où le rôle de la variation du moment de charge dans le déclenchement. La première étape de la figure 14 montre l'environnement électrique d'un orage schématisé par le dipôle classique, avec un « bouclier » de charges négatives qui s'accumulent au-dessus de l'orage et dont la densité



augmente vers le bas à cause de la conductivité qui décroît (Pasko et al., 1997). La deuxième étape montre comment, suite à une neutralisation du pôle nuageux positif par un éclair, le champ électrique va s'inverser et s'intensifier dans la région de la mésosphère au-dessus des charges négatives. À cause de la forte conductivité de l'air à cette altitude, ces conditions ne peuvent persister plus de quelques dizaines de ms environ, c'est-à-dire au-delà du temps de relaxation – on parle de champ électrique quasi statique –, mais elles permettent la propagation de streamers vers le bas. Le champ électrique rencontré est suffisant pour assurer la propagation du streamer à une vitesse de l'ordre de  $10^7$  m.s<sup>-1</sup> sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. La figure 15, qui montre une succession d'images du développement d'un sprite obtenues avec une caméra rapide, illustre bien les aspects de structure et de propagation (Cummer et al., 2006). Dans ce cas, le sprite présente très distinctement un branchement très développé et une région supérieure beaucoup plus diffuse. Les conditions requises pour le déclenchement de ce type de décharge peuvent être atteintes simultanément en plusieurs zones de même altitude au-dessus de l'orage, et du coup le phénomène sprite aura plusieurs éléments répartis sur des dizaines de kilomètres, comme le montre certaines images de la figure 4.

Ces caractéristiques sont différentes de celles d'un éclair nuage-sol classique, qui démarre également par une décharge locale dans le nuage, suivie ensuite de la propagation par pas (ou par bond) d'un leader (stepped-leader en anglais) à la tête duquel un streamer peut progresser sur des courtes distances correspondant aux pas (Soula, 2003). L'observation montre même la présence de deux leaders, l'un positif et l'autre négatif, se propageant dans des directions globalement opposées, c'est la théorie du bi-leader. La vitesse de propagation d'un leader est de l'ordre de  $10^5$  m.s<sup>-1</sup>. Lorsque l'un des leaders s'approche du sol, un leader de connexion se forme à partir du sol et vient à sa rencontre pour établir le contact entre le nuage et le sol permettant un transfert important de charges du sol vers le nuage : c'est l'arc-en-retour d'une durée de quelques microsecondes et dont le pic de courant peut atteindre plusieurs dizaines de kA, voire même dans certains cas des centaines de kA.



La dynamique et la géométrie des streamers, qu'ils soient positifs ou négatifs, dépend beaucoup des électrons sources issus du milieu ambiant et de la photo-ionisation due au rayonnement UV issu des régions de fort champ électrique à la tête du streamer. La photo-ionisation est beaucoup plus efficace en altitude et on va donc avoir une forte production de paires ion-électron à l'altitude de développement des sprites (40-90 km). Liu et Pasko (2004) ont étudié la sensibilité à l'altitude d'un modèle de double streamer en calculant l'évolution de la densité d'électrons après avoir appliqué un champ électrique égal à 1,5 fois le champ de rupture diélectrique. La figure 16

montre cette densité au sol, à 30 km et à 70 km d'altitude. Afin de pouvoir comparer les trois situations, le temps de calcul et les dimensions de son domaine sont dans le rapport inverse des concentrations de gaz (soit environ 1/N). Les différences observées aux trois altitudes dépendent essentiellement de la photo-ionisation due aux UV produits par les états excités de la molécule N<sub>2</sub>, considérablement réduite à faible altitude. Les vitesses de propagation et d'expansion sont élevées dans les trois cas. Celle obtenue à 70 km de l'ordre de  $10^7$  m.s<sup>-1</sup> correspond bien aux observations faites sur les sprites avec les caméras rapides (Moudry et al., 2003). De même, les

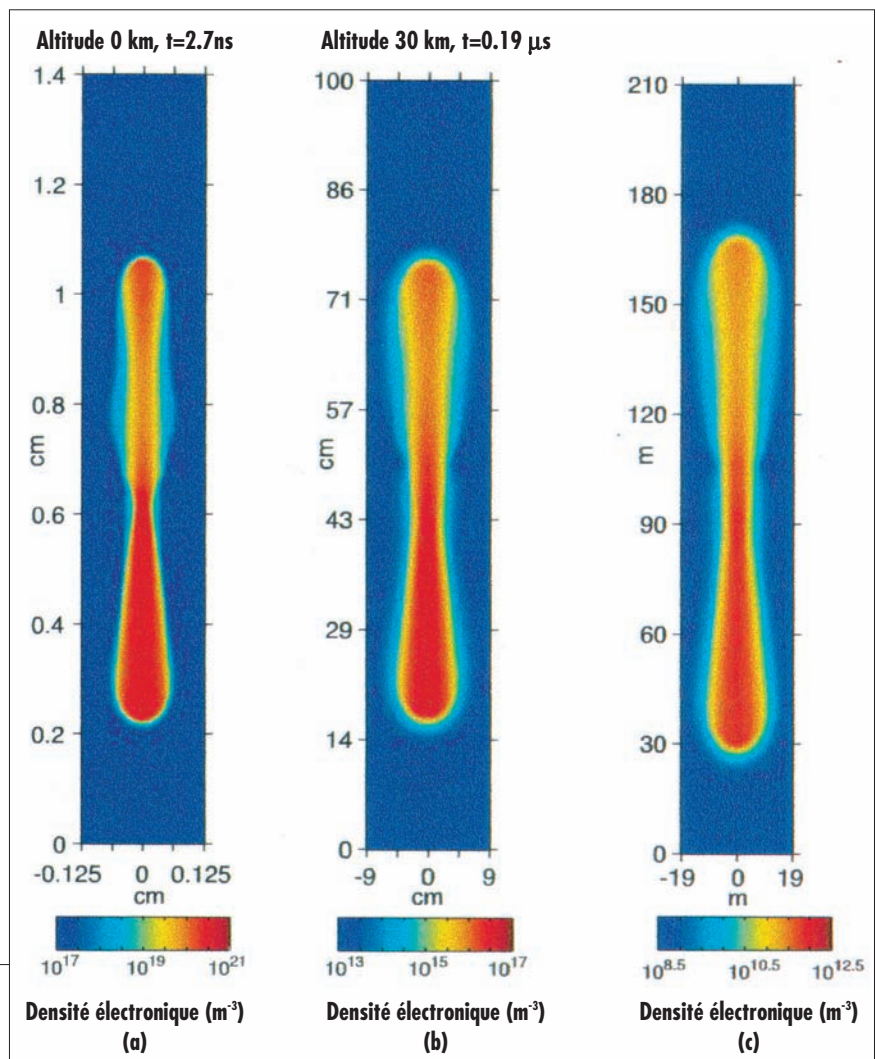


Figure 16 - Distribution de la densité d'électrons dans un modèle de streamer à différentes altitudes : a - au sol ; b - à 30 km et c) à 70 km. (D'après Liu et Pasko, 2004).

tailles obtenues à cette altitude, quelques dizaines de mètres de rayon, sont proches de celles qui sont observées (Gerken et al., 2000).

## Conclusions et perspectives

La découverte des TLE et des flashes gamma d'origine terrestre (TGF pour Terrestrial Gamma Flash) a révélé la possibilité d'importants transferts d'énergie impulsifs entre la troposphère et les couches supérieures de l'atmosphère. L'énergie totale dissipée par un de ces événements serait de l'ordre de dizaines de mégajoules et les puissances mises en jeu se compteraient en gigawatts (Heavner, 2000). L'énergie des électrons intervenant dans ces décharges électriques varie de quelques eV à quelques dizaines de MeV et les radiations produites couvrent l'ensemble du spectre électromagnétique. Ces phénomènes pourraient jouer un rôle dans l'équilibre chimique de l'atmosphère (ozone et oxydes d'azote) ainsi que dans le circuit électrique global de la Terre et pourraient perturber les ceintures de radiation. Les mécanismes source font intervenir des processus physiques qui n'avaient pas été envisagés jusqu'à présent et qui pourraient avoir des implications plus larges et se manifester dans d'autres environnements planétaires. Aussi, la recherche sur ces phénomènes a rassemblé des scientifiques d'horizons divers (physique de la décharge, physique de l'atmosphère, chimie de l'environnement, physique du rayonnement, structure de l'ionosphère...). Le projet européen CAL en est un exemple (Neubert et al., 2005).

Pour comprendre ces phénomènes, des mesures simultanées des manifestations associées au sol et dans l'espace sont indispensables. Les satellites fournissent des informations globales ainsi que la mesure de paramètres, comme les émissions gamma, difficiles à mesurer depuis le sol, tandis que les mesures au sol permettent d'étudier les détails des émissions lumineuses et des émissions radio ainsi que la structure des régions orageuses où apparaissent ces phénomènes. Le projet de microsatellite français *Taranis* (Tool for the Analysis of Radiation from Lightning and Sprites) est préparé pour répondre à ces objectifs (Lefeuvre et al., 2008). La particularité de *Taranis* consiste à effectuer des observations au nadir au-dessus des régions orageuses, comme cela a été effectué depuis la station spatiale internationale ISS [International Space Station] (Blanc et al., 2004), alors que l'instrument taiwanais *Isual*, cité page 22, effectue des observations à l'horizon. Un autre projet spatial européen prépare l'expérience *Atmosphere-Space Interactions Monitor* (Asim) prévue sur l'ISS. D'autres projets spatiaux sont en cours de préparation : microsatellite russe *Chibi*, le satellite *Sprite-Sat* au Japon... Les observateurs de sprites ont de belles nuits devant eux.

## Remerciements

Les auteurs remercient les participants au projet européen CAL, notamment son coordonnateur Torsten Neubert du Centre spatial danois (DSRI) et les opérateurs successifs de la caméra du pic du Midi en 2003 et 2006-2007, Thomas Allin et Olivier Chanrion du DSRI également. Ils remercient aussi Météo-France pour la fourniture des images radar du réseau

## Vidéos jointes à la version en ligne sur

[irevues.inist.fr/la-meteorologie](http://irevues.inist.fr/la-meteorologie)

### Sprites

Un groupe de sprites (colonne et méduse) au-dessus d'un orage le 12 mai 2008 dans la région d'Angoulême (Charente) vu depuis Lanne-meizan (Hautes-Pyrénées) [distance 300 km environ].

### Elve et sprite

Un elve suivi d'un sprite au-dessus d'un orage à l'ouest de la Corse le 16 novembre 2007 vu depuis Lanne-meizan (Hautes-Pyrénées) [distance 600 km environ].

### Halo et sprites

Sprites avec halo au-dessus d'un orage dans le Sud-Ouest le 12 septembre 2006 vu depuis le mont Aigoual, dans le Massif central [distance 350 km environ].

### TLE

En reconstitution colorée par le Danish National Space Center (voir légende figure 3).

Aramis et Météorage pour la fourniture des données de localisation d'éclairs. Certaines données utilisées ont été traitées par Julien Palmiéri, stagiaire de Master au Laboratoire d'aérodynamique (LA), que les auteurs remercient sincèrement. Ils remercient particulièrement Monique Macaigne du LA pour son aide dans les opérations financières liées à CAL. Les observations avec la caméra du CRA en 2007 ont été possibles grâce à l'assistance technique de Fabrice Gangneron, Yves Meyerfeld et Éric Pique du LA que les auteurs remercient vivement.

## Bibliographie

- Blanc E., T. Farges, R. Roche, D. Brebion, T. Hua, A. Labarthe et V. Melnikov, 2004 : Nadir observations of sprites from the International Space Station. *J. Geophys. Res.*, 109, A02306, DOI:10.1029/2003JA009972.
- Boccippio D. J., E. R. Williams, S. J. Heckman, W. A. Lyons, I. T. Baker et R. Boldi, 1995 : Sprites, ELF transients, and positive ground strokes. *Science*, 269, 1088.
- Boeck W. L., O. H. Vaughn Jr., R. Blakeslee, B. Vonnegut et M. Brook, 1992 : Lightning induced brightening in the airglow layer. *Geophys. Res. Lett.*, 19(2), 99-102.
- Cummer S. A. et W. A. Lyons, 2005 : Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation. *J. Geophys. Res.*, 110, A04304, DOI:10.1029/2004JA010812.
- Cummer S. A., N. Jaugey, J. Li, W. A. Lyons, T. E. Nelson et E. A. Gerken, 2006 : Submillisecond imaging of sprite development and structure. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04104, DOI:10.1029/2005GL024969.
- Franz R. C., R. J. Nemzek et J. R. Winckler, 1990 : Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science*, 249, 48.
- Fukunishi H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan, et W. A. Lyons, 1996 : Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 23(16), 2157-2160.
- Gerken E., U. Inan et C. Barrington-Leigh, 2000 : Telescopic imaging of sprites. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2637-2640.

- **Heavner M. J.**, 2000 : *Optical spectroscopic observations of sprites, blue jets, and elves: Inferred microphysical processes and their macrophysical implications*. Ph. D. dissertation, University of Alaska, Fairbanks, A.K., 141 p.
  - **Inan U. S., C. Barrington-Leigh, S. Hansen, V. S. Glukhov, T. F. Bell et R. Rairden**, 1997 : Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric flashes referred to as "elves". *Geophys. Res. Lett.*, 24(5), 583-586.
  - **Lefevre F., E. Blanc** et al., 2008 : Taranis - A Satellite Project Dedicated to the Physics of TLEs and TGFs. *Space Science Reviews*, vol. 137, no. 1, p. 301-315, DOI: 10.1007/s11214-008-9414-4.
  - **Liu N. et V. P. Pasko**, 2004 : Effects of photoionization on propagation and branching of positive and negative streamers in sprites. *J. Geophys. Res.*, 109, A04301, DOI:10.1029/2003JA010064.
  - **Lyons W. A.**, 1994 : Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video. *Geophys. Res. Lett.*, 21(10), 875-878.
  - **Marshall J. S. et W. M. Palmer**, 1948 : The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 5, 165-166.
  - **Mazur V., X. Shao et P. R. Krehbiel**, 1998 : "Spider" lightning in intracloud and positive cloud-to-ground flashes. *J. Geophys. Res.*, 103(D16), 19811-19822.
  - **Moudry D. R., H. C. Stenbaek-Nielsen, D. D. Sentman et E. M. Wescott**, 2003 : Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1 ms time resolution. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 65, 509-518, DOI:10.1016/S1364-6826(02)00323-1.
  - **Neubert T., T. H. Allin, H. Stebaek-Nielsen et E. Blanc**, 2001 : Sprites over Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3585, 2001.
  - **Neubert T.** et al., 2005 : Co-ordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite2003 campaign. *J. Atm. and Sol.-Terr. Phys.*, 67, 807-820.
  - **Parent du Châtelet J.**, 2003 : Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 40, 44-52.
  - **Pasko V., U. Inan et T. Bell**, 1998 : Spatial Structure of Sprites. *Geophys. Res. Lett.*, 25(12), 2123-2126.
  - **Pasko V., U. Inan, T. Bell et Y. Taranenko**, 1997 : Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 102(A3), 4529-4561.
  - **Pasko V., M. A. Stanley, J. D. Mathews, U. S. Inan et T. G. Wood**, 2002 : Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature*, 416, 152-154, DOI:10.1038/416152a.
  - **Soula S.**, 2003 : Les réseaux d'observation des éclairs. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 40, 53-58.
  - **Soula S., O. Van der Velde, J. Montanya, T. Neubert, O. Chanrion et M. Ganot**, 2009 : Analysis of thunderstorm and lightning activity associated with sprites observed during the EuroSprite campaigns: Two case studies. *Atmos. Res.*, 91, 514-528, DOI:10.1016/j.atmosres.2008.06.017.
  - **Su H.-T., A. B. Chen, C. L. Kuo, Y. J. Lee, R. R. Hsu, J. L. Chern, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, H. Fukunishi et L. C. Lee**, 2007 : *Global Occurrence of TLE's and their effects*. Proceedings of International Conference of Atmospheric Electricity, Beijing, Chine, 13-17 August, 2007.
  - **Van der Velde O. A., Á. Mika, S. Soula, C. Haldoupis, T. Neubert et U. S. Inan**, 2006 : Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes. *J. Geophys. Res.*, 111, D15203, DOI:10.1029/2005JD006879.
  - **Van der Velde O. A., W. A. Lyons, T. E. Nelson, S. A. Cummer, J. Li et J. Bunnell**, 2007 : Analysis of the first gigantic jet recorded over continental North America. *J. Geophys. Res.*, 112, D20104, DOI:10.1029/2007JD008575.
  - **Vaughan O. H. Jr. et B. Vonnegut**, 1989 : Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the clear air above. *J. Geophys. Res.*, 94, 13179-13182.
  - **Wescott E. M., D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton et M. Heavner**, 1995 : Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets. *Geophys. Res. Lett.*, 22(10), 1209-1212.
  - **Wescott E. M., D. D. Sentman, M. J. Heavner, D. L. Hampton, D. L. Osborne et O. H. Vaughan Jr.**, 1996 : Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm. *Geophys. Res. Lett.*, 23(16), 2153-2156.
  - **Wilson C.T.R.**, 1925 : The electric field of a thunderstorm and some of its effects. *Proc. Roy. Soc. London*, 37, 32D.
-