



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique


Serge Soula

La face cachée des orages

Volume 353 (2025), p. 747-760

En ligne depuis le 16 juin 2025

<https://doi.org/10.5802/crmeca.301>

 Cet article est publié sous la licence
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de recherche / *Research article*

La face cachée des orages

The hidden face of storms

Serge Soula ^a

^a Laero, Université de Toulouse, CNRS, IRD, Toulouse, France
Courriel : serge.soula@univ-tlse3.fr

Résumé. Les orages sont associés à des nuages de fort développement vertical appelés cumulonimbus qui abritent des régions chargées électriquement. Ils produisent des éclairs au sein du nuage et entre celui-ci et le sol. Au-dessus du nuage, plusieurs types de décharges électriques peuvent se produire et sont regroupés sous le terme TLE, de l'anglais *Transient Luminous Event* : les *blue starters*, les *blue jets* et les *jets* géants émergent du sommet nuageux et se différencient par l'altitude qu'ils atteignent (environ 20 km, 40 km et 90 km, respectivement), la région du nuage où ils démarrent et la polarité de la charge qu'ils transfèrent; les *sprites* (farfadets en français) qui se déclenchent aux alentours de 70 km d'altitude au-dessus des régions stratiformes suite à un éclair nuage-sol positif; les Elves sous la forme d'un anneau lumineux à la base de l'ionosphère (90 km la nuit) produites par des puissants éclairs nuage-sol. Cet article décrit les principales caractéristiques et les mécanismes de formation de ces TLEs.

Abstract. Thunderstorms are associated with clouds of strong vertical development called cumulonimbus which contain electrically charged regions. They produce lightning flashes within the cloud and between it and the ground. Above the cloud, several types of electrical discharges can occur and are grouped under the term TLE, from the English *Transient Luminous Event*: blue starters, blue jets and giant jets emerge from the cloud top and are differentiated by the altitude they reach (around 20 km, 40 km and 90 km, respectively), the region of the cloud where they start and the polarity of the charge they transfer; sprites (farfadet in French) which are triggered at about 70 km altitude above the stratiform regions following a positive cloud-to-ground flash; Elves in the form of luminous rings at the base of the ionosphere (90 km at night) produced by powerful cloud-to-ground lightning. This article describes the main characteristics and formation mechanisms of these TLEs.

Mots-clés. Orage, Décharge électrique, Phénomène lumineux transitoire, Éclairs, Cumulonimbus.

Keywords. Thunderstorm, Electrical discharge, Transient luminous event, Lightning flash, Cumulonimbus.

Manuscrit reçu le 19 mars 2025, accepté le 5 mai 2025.

1. Introduction

L'orage est un phénomène météorologique qui s'accompagne d'une part d'un nuage spécifique, le cumulonimbus, d'autre part d'une manifestation électrique bien particulière, l'éclair. Le cumulonimbus est un nuage à fort développement vertical qui se forme dans des conditions de forte instabilité atmosphérique [1]. Il atteint la tropopause, voire la dépasse avec des excroissances (*overshoot* en anglais), aux alentours de 12 km d'altitude aux latitudes tempérées et à plus de 15 km dans les régions tropicales. C'est donc un nuage qui contient une grande diversité d'espèces microphysiques liquides et glacées, des courants ascendants et descendants, mais aussi des charges électriques des deux signes et portées par les hydrométéores dans certaines régions

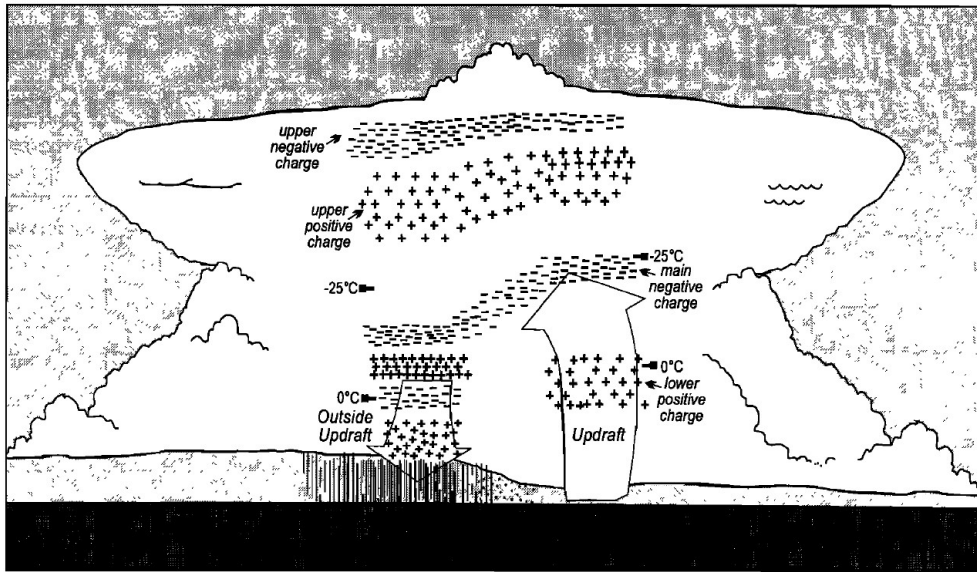


FIGURE 1. Structure dynamique et répartition de charges dans un nuage de type cumulonimbus. Tiré de [3].

du nuage (Figure 1). Les charges électriques sont notamment le résultat de collisions entre hydrométéores glacés, les cristaux de glace et les particules de graupel ou neige roulée par effet thermoélectrique [2]. Entre les zones chargées de polarité différente, des décharges peuvent se former lorsque la différence de potentiel est suffisante par rapport au contexte microphysique présent. La propagation de la décharge définit ce que l'on appelle l'éclair, caractérisé par une succession de processus physiques, des courants, un parcours et une géométrie qui permet de les classer en différentes catégories : les éclairs intranuage qui ne sortent pas du milieu nuageux, positifs ou négatifs suivant le sens conventionnel du courant qu'ils portent; les éclairs nuage-sol qui connectent le nuage et le sol, positifs (négatifs) s'ils amènent de la charge positive (négative) au sol. Pour ces derniers, on parle aussi d'éclairs descendants (ascendants) si la première phase appelée traceur part du nuage (du sol) comme dans la grande majorité des cas. Certains éclairs peuvent aussi être classés comme inter-nuage ou nuage-air s'ils connectent deux nuages distincts ou s'ils finissent hors du milieu nuageux.

Les orages peuvent avoir différentes durées, tailles ou organisations, ce qui se traduit aussi par des activités électriques spécifiques. La plus petite structure est la cellule orageuse d'une dizaine de km de diamètre et d'une durée inférieure à l'heure. Les orages multicellulaires se forment lorsque les conditions sont plus favorables et se maintiennent sur des plus grands domaines. La supercellule engendre les phénomènes les plus violents tels que la grosse grêle et les tornades. Les phénomènes convectifs de méso-échelle, comme les lignes de grain, ont des durées de vie de plusieurs heures et peuvent parcourir des distances de plusieurs centaines de kilomètres. L'identification de certains phénomènes ou formes caractéristiques, comme les *bow echos* ou les structures en V, peut fournir une classification plus détaillée des orages.

Les manifestations évoquées, qu'elles soient électriques, dynamiques ou microphysiques sont visibles depuis le sol ou détectables avec des instruments adaptés comme les radars météorologiques ou les capteurs d'éclairs. L'orage interagit aussi électriquement avec les couches de l'atmosphère au-dessus de lui. Il participe notamment au circuit global entre la Terre et l'ionosphère avec une contribution qui amène au sol de la charge négative. Ce qui se passe au-dessus du nuage

d'orage sur le plan des décharges électriques est resté longtemps un mystère et est devenu un sujet d'étude pour les électriciens de l'atmosphère depuis quelques décennies. Ces aspects sont développés dans l'article.

2. Les phénomènes lumineux transitoires

2.1. *Un peu d'histoire*

Les premières observations de phénomènes lumineux au-dessus des nuages sont évoquées sous des formes imagées dans la littérature dès la fin du XIX^e siècle, puis plus tard dans les années 60 par des noms célèbres de la discipline dans les ouvrages généraux d'électricité atmosphérique [4]. Vonnegut [5] parlait aussi de ces éclairs inhabituels. Plus récemment, Vaughan et Vonnegut [6] ont réalisé une compilation de témoignages potentiellement crédibles sur des observations de décharges lumineuses émergeant du sommet du nuage d'orage. Les 15 témoignages par des pilotes ou anciens pilotes recensés situent la plupart des observations dans les années 60 à 80 et parlent d'éclairs se terminant dans l'air à plusieurs kilomètres au-dessus du nuage. Certains orages pouvaient produire plusieurs décharges ascendantes au cours de leur cycle de vie. Les pilotes d'avion n'insistaient pas trop sur ces manifestations visuelles éphémères qui n'étaient pas faciles à décrire et pouvaient susciter des doutes sur leur acuité visuelle, préférant différer les témoignages par rapport aux observations. Dans tous les cas, les observations ne s'appuyaient pas sur des images associées.

Le 6 juillet 1989 va marquer le début d'une longue série d'observations de ces phénomènes lumineux que l'on va appeler plus tard les TLEs de l'expression *Transient Luminous Events*. En effet, au cours de la nuit, une équipe de l'université du Minnesota conduite par le Professeur Winckler, testait une caméra vidéo noir et blanc très sensible prévue pour des prises de vue d'un sondage par fusée, en observant des étoiles dans un ciel clair. L'analyse des images obtenues révélait un enregistrement singulier sous la forme d'un phénomène lumineux double de très faible durée (moins de 30 ms). Il avait été produit au-dessus d'un orage lointain de type *Mesoscale Convective System* (MCS) dans le Minnesota à une distance d'environ 250 km au nord du site d'observation [7]. La Figure 2 montre le cliché de cette observation.

Cette observation venait valider la théorie du physicien écossais Wilson, prix Nobel de Physique en 1927 pour la mise au point de la chambre de condensation, ou chambre de Wilson, qui permet la visualisation des trajectoires de particules ionisantes. En effet, il avait suggéré l'existence de décharges électriques à des altitudes élevées au-dessus des orages, grâce au champ électrique produit juste après un éclair nuage-sol qui neutralise suffisamment de charge dans le nuage d'orage. Comme le montre la Figure 3, le champ électrique produit par le nuage après l'éclair à une altitude de l'ordre de 70 km 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 [8]. Une décharge déclenchée à cette altitude pourrait ensuite se propager dans des champs électriques ambiants plus faibles, comme tout type de décharge atmosphérique incluant bien sûr les éclairs que ce soit au sein du nuage ou à l'extérieur.

2.2. *Les premières campagnes d'observations et la classification des TLEs*

Suite à la première observation, les années 90 allaient voir le développement d'expériences pour tenter d'en reproduire, notamment depuis la navette spatiale. Rapidement, de nouvelles manifestations lumineuses étaient identifiées avec des caméras embarquées. Ce fut le cas avec



FIGURE 2. Première image d'une décharge lumineuse obtenue avec une caméra TV sensible dans la nuit du 5 au 6 juillet 1989 au-dessus d'un orage dans le nord-ouest du Lac Supérieur au nord des États-Unis. Tiré de [7].

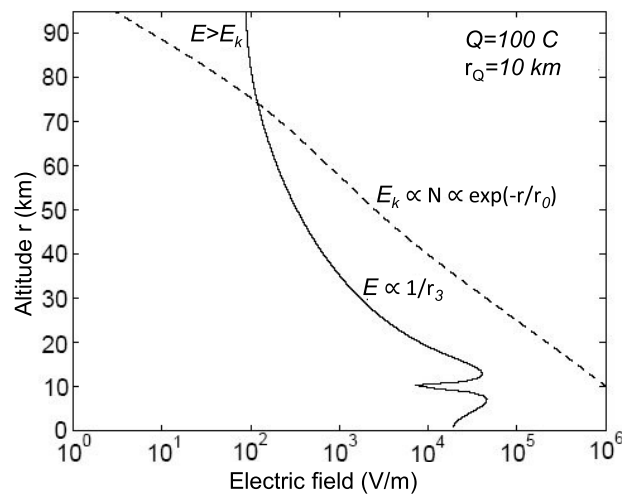


FIGURE 3. Allure des profils verticaux des champs électriques : E produit par une charge Q placée à 10 km d'altitude et E_k nécessaire à une décharge électrique [9]. À une certaine altitude (ici entre 70 et 75 km), le champ produit par le nuage peut être suffisant pour produire une ajoutée adaptée de [9].

des intensifications lumineuses diffuses successives à des éclairs (rapporté dans [10]), sous la forme d'anneaux lumineux (100–300 km) à la base de l'ionosphère, formellement identifiées plus tard à partir des observations de campagnes américaines et nommées Elves, comme *Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources* [11]. Vaughan *et al.* [12] publiait dans la rubrique la photo du mois du journal *Monthly Weather Review* une image d'éclair nuage-air photographiée le 28 avril 1990 par une caméra sur une navette américaine alors qu'elle volait au-dessus de la Mauritanie. Le 7 juillet 1993, pas moins de 250 événements lumineux étaient enregistrés en quelques heures, produits au-dessus d'un MCS dans le Kansas à quelque 400 km du site d'observation au sol dans le Colorado [8]. De même, un avion DC-8 de la NASA équipé d'une caméra plein ciel allait faire des observations du même type [13]. Ces « éclairs » visibles au-dessus des orages reproduisant la première observation publiée dans [7], allaient être baptisés « sprites » par Dave Sentman, du nom des esprits fugitifs évoqués par William Shakespeare dans ses pièces. En français, la traduction est farfadet. Un peu plus tard, les sprites étaient photographiés en couleur, ce qui faisait ressortir nettement leur couleur dominante dans le rouge [14]. Les campagnes d'observation se succédaient au cours des années 90, essentiellement aux États-Unis, et un nouveau phénomène inattendu allait venir enrichir la famille en construction, les *blue jets* [15]. Au cours de la même campagne d'observation, d'autres types de décharges avec des points communs aux *blue jets* étaient identifiés, c'était les *blue starters* [16].

La fin des années 90 était marquée par les premières observations sur d'autres continents, notamment au Japon avec des orages en hiver [11], en Australie [17] et en Europe [18,19]. Des travaux théoriques à la fin des années 90, montraient par des modèles, les mécanismes impliqués dans ces décharges d'altitude [20]. Le début des années 2000 a été marqué par de nombreux projets et des développements instrumentaux qui allaient analyser plus en détail la structure et le développement des TLEs, notamment par l'utilisation de caméras rapides ou télescopiques [21]. Au tout début des années 2000, un nouveau type de TLE allait être découvert au cours de campagnes d'observation, le *jet géant* qui est sans doute le plus spectaculaire [22].

La Figure 4 schématise l'ensemble des TLEs en montrant leur aspect, leur développement vertical et leur localisation par rapport à l'orage de type MCS dans ce cas. On y retrouve les sprites au-dessus de la partie stratiforme du système orageux avec deux cas, l'un de type colonne d'aspect filamenteux et l'autre de type carotte d'aspect plus massif, avec une altitude de déclenchement d'environ 70 km, un développement vertical de plusieurs dizaines de km et la présence d'un halo qui peut accompagner ou non le sprite. Le halo peut aussi apparaître seul comme nous le verrons plus tard. L'Elve est représentée avec une extension horizontale de plusieurs centaines de km et une altitude correspondant à la base de l'ionosphère à 90 km environ la nuit. Les *blue jets* et les *jets géants* sont associés à la région convective de l'orage et atteignent des altitudes respectives d'environ 30 à 40 km et 90 km. Il est à noter que d'autres membres de la famille des TLEs ne figurent pas dans cette représentation, comme les *blue starters*, les *pixies*, ou encore les *trolls*, qui eux n'atteignent que des altitudes de quelques km au-dessus du nuage. Les éclairs émergeant du sommet du nuage ne sont pas classés comme des TLEs et atteignent des altitudes plus faibles que les *jets* bleus ou les *blue starters*.

3. Les principaux TLEs

3.1. Les sprites

Les formes générales de ce TLE sont diverses et ont permis d'établir une classification propre basée sur des ressemblances avec des formes connues (paréidolie). Ainsi, Bór [23] montre une classification comprenant des colonnes, des carottes, des anges, des arbres, des « wishbones » et

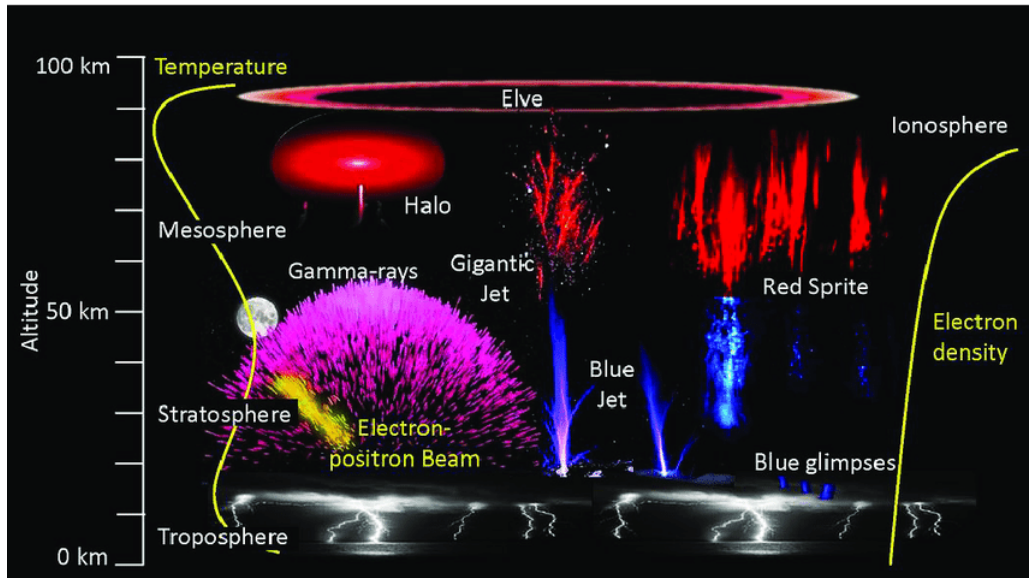


FIGURE 4. Représentation schématique des principaux TLEs dans leur environnement au-dessus d'un orage.

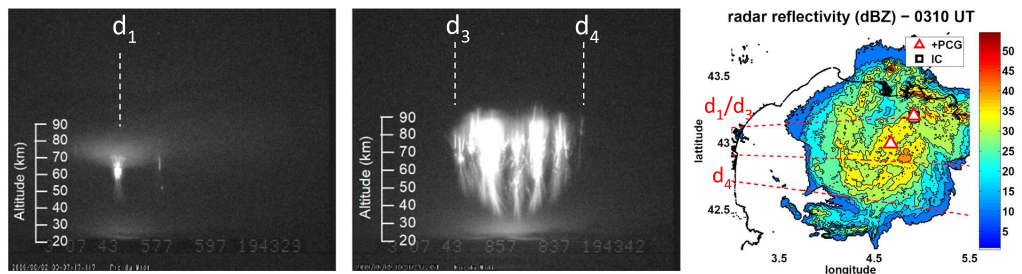


FIGURE 5. Deux images de 20 ms tirées de la vidéo d'un cas de sprite de grande taille et très lumineux enregistrée au cours de la nuit du 1^{er} au 2 septembre 2009. À droite, réflectivité radar dans l'orage avec la position des arcs positifs (triangles) associés au sprite et les azimuts de direction (d_1 , d_3 et d_4) depuis la caméra au pic du Midi. Adapté de [24].

des méduses à partir de 489 événements observés en Europe Centrale entre 2007 et 2009. De plus, chaque événement peut présenter des structures multiples d'éléments sous forme de filaments, de corps lumineux, de lueurs diffuses (*glows* en anglais), de perles et peut se développer par brèves séquences séparées dans le temps et dans l'espace pour constituer le « dancing sprite ». La Figure 5 montre un exemple de ces structures avec un sprite de grande taille et particulièrement lumineux observé au-dessus d'un orage dans le golfe du Lion en septembre 2009 à environ 350 km avec une caméra au pic du Midi de Bigorre. Dans ce cas, les deux images de 20 ms d'exposition correspondent à la première et la dernière de l'événement qui s'étale sur environ 300 ms simultanément à un éclair nuage-sol positif [24]. Cet éclair a produit deux impacts positifs au sol séparés d'environ 30 km sous la région stratiforme d'un orage de type MCS. En effet, les sprites se révèlent être intimement liés aux éclairs nuage-sol positifs [25] même si très rarement ils peuvent être associés à un éclair nuage-sol négatif [26] ou à un éclair intranuage [27].

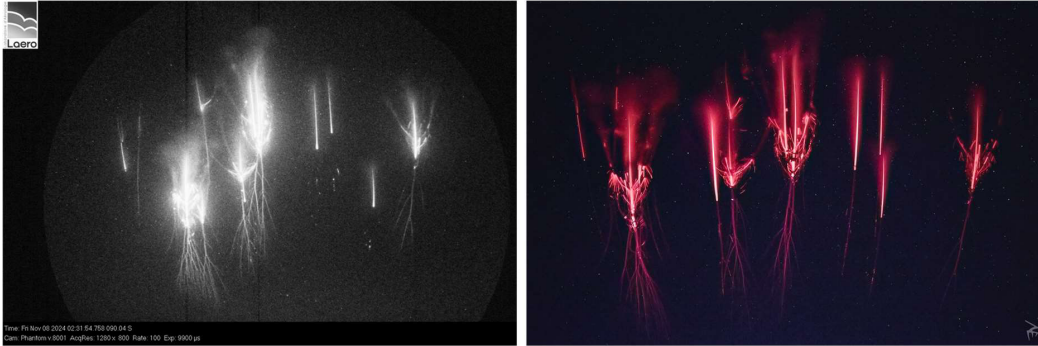


FIGURE 6. Deux images du même sprite vu sous deux angles légèrement différents le 8 novembre 2024 dans le sud de la France : à gauche image extraite d'une vidéo enregistrée à 100 images/seconde par Emmanuel Leclerc à 130 km de l'orage, à droite photo en pose par Nicolas Escurat à 300 km de l'orage.

Du point de vue de la physique de la décharge, c'est le type streamer qui est impliqué, de polarité positive et de propagation vers le bas dans sa première phase c'est-à-dire correspondant à une charge positive qui descend. L'émission de lumière dominante rouge correspond à des transitions dans la première bande positive de la molécule d'azote (N_2), principal constituant de l'air dans les 100 premiers kilomètres [28]. La Figure 6 montre un cas de sprite d'une durée de quelques dizaines de ms en noir et blanc et en couleurs réelles.

Le déclenchement d'un sprite pendant un éclair répond à des conditions spécifiques de champ électrique quasi statique à une altitude d'environ 70 km, qui peuvent être atteintes lorsque l'éclair neutralise suffisamment de charge dans le nuage [20]. De ce fait, le paramètre de l'éclair le plus pertinent pour établir un critère de déclenchement est le changement de moment de charge (CMC) produit de la charge écoulee par la longueur du canal de l'éclair [29]. Ce sont donc les éclairs nuage-sol neutralisant une charge d'un seul signe et localisée vers le sommet du nuage (le plus souvent positive) qui ont le plus d'impact sur la variation du champ électrique au-dessus du nuage. La Figure 7 schématise la chronologie typique des processus qui conduisent à la production du sprite.

3.2. Les Elves

Les Elves sont des émissions optiques dans la région D de l'ionosphère [30] en forme d'anneaux de quelques centaines de kilomètres de diamètre, centrés au-dessus des éclairs nuage-sol qui produisent de très fortes impulsions électromagnétiques (EMP) (Figures 8 et 9). Elles sont dues à l'excitation des première et deuxième bandes positives de la molécule d'azote par des électrons libres accélérés par la forte impulsion EMP [30,31]. Des modèles ont reproduit avec succès des aspects tels que la forme, la vitesse d'expansion, ainsi que l'emplacement et l'intensité des émissions optiques des Elves en réponse à l'impulsion de l'éclair et aux profils verticaux de densité électronique et d'espèces neutres (par exemple [31]). Ces auteurs ont calculé le champ électrique produit par des impulsions électromagnétiques en simulant les éclairs comme des canaux verticaux ou horizontaux. La Figure 10 montre les résultats dans les deux cas de figure et en fonction du temps, un champ électrique rayonné de $20 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ à 100 km de la décharge verticale au sol (noté E_{100} dans la littérature) qui correspond à un pic de courant de 56 kA pour un éclair nuage-sol (figures de gauche) et un champ E_{100} de $7 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ pour une décharge horizontale (figures de droite).

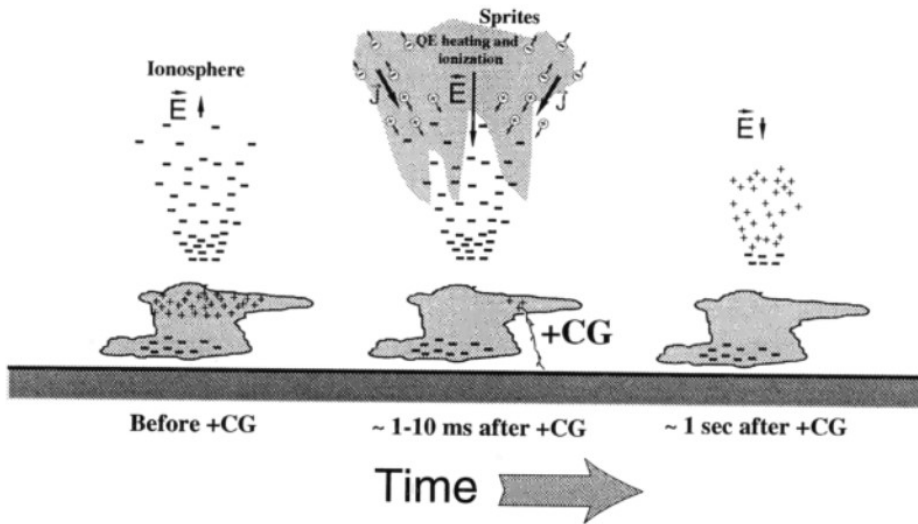


FIGURE 7. Illustration du mécanisme de pénétration d'un grand champ quasi-électrostatique (noté E) créé par le nuage dans la mésosphère après un éclair nuage-sol positif, conduisant au chauffage des électrons, au démarrage de l'ionisation et à la production d'émission lumineuse. Tiré de [20].



FIGURE 8. Image d'une Elve enregistrée avec une caméra sensible au Pic du Midi le 22 février 2012.

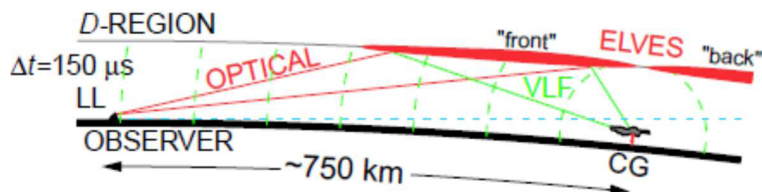


FIGURE 9. Schéma pour illustrer la formation d'une Elve (zone rouge) au-dessus de l'orage produite par une éclair nuage-sol (CG) de forte puissance. Le centre de l'anneau lumineux s'explique par le peu de puissance rayonnée à la verticale de l'éclair, c'est-à-dire dans l'axe longitudinal du canal de l'éclair.

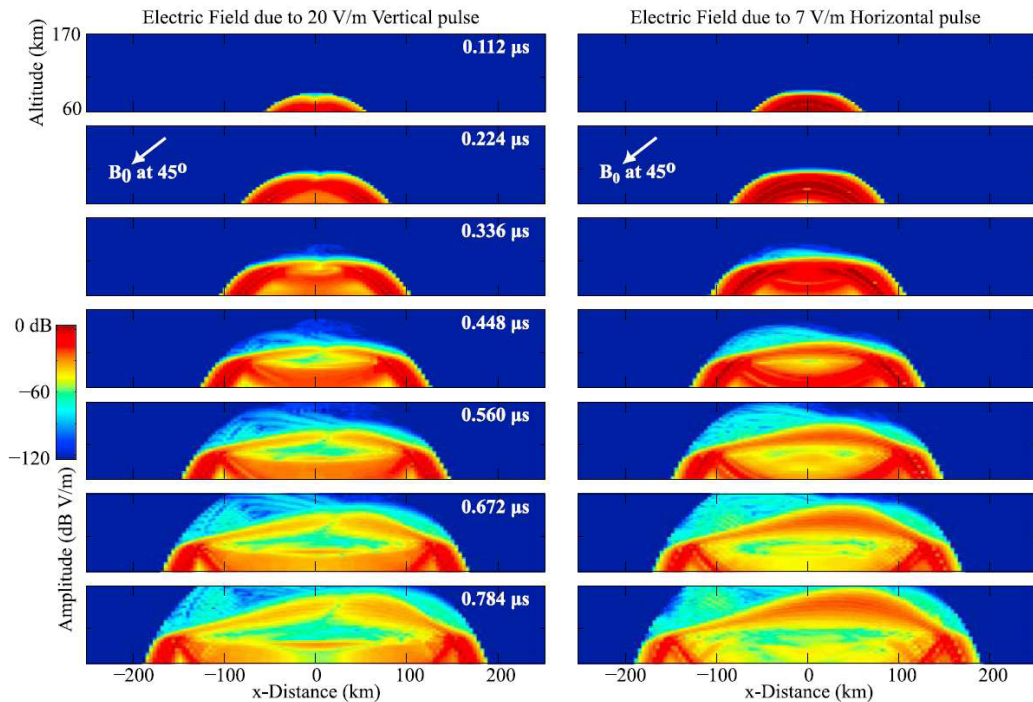


FIGURE 10. Amplitude du champ électrique des impulsions électromagnétiques (EMP) simulées suite à une décharge verticale (à gauche) et horizontale (à droite). Tiré de [31].

3.3. Les jets géants

Ce sont les TLEs qui ont la plus grande extension verticale puisqu'ils démarrent du nuage et atteignent la base de l'ionosphère à environ 90 km la nuit. Ils sont aussi les plus rarement observés et les premières vidéos montraient que le phénomène pouvait être décomposé en 2 phases : le *leading jet* (LJ par la suite) qui dans un premier temps trace le parcours de la décharge avec des branches plus ou moins développées vers le haut et le *trailing jet* (TJ par la suite) qui apparaît comme une décharge secondaire plus lumineuse mais moins développée verticalement [22]. La Figure 11 montre cinq cas de *jets* géants observés à une distance d'environ 50 km de l'orage depuis l'île de la Réunion le 7 mars 2009 [32].

Les détections de radiations électromagnétiques à extrêmement basse fréquence (ULF-ELF) associées à ces *jets* géants ont permis de déterminer que la charge transportée vers le haut est négative [33]. La quantité de charge écoulee peut être importante car le processus de décharge peut durer plusieurs centaines de millisecondes, notamment pendant le phase *trailing jet*. Le cas illustré par la Figure 12a correspond à un *jet* géant observé le 21 juillet 2008 au-dessus de la tempête tropicale *Cristobal* dans l'est des États-Unis à une distance d'environ 350 km. La première phase du *jet* engendrait un moment de courant maximum de 55 kA km et, en l'intégrant sur la durée du *jet*, les auteurs ont estimé un CMC colossal de 10 800 C km, bien supérieur aux valeurs trouvées jusque-là, ce qui leur permettait d'estimer la charge transférée autour de 144 C. Un éclair nuage-sol ne peut neutraliser de telles charges que s'il a une forte composante continue, ce qui est le cas de certains éclairs nuage-sol positifs [34]. Dans le cas de la Figure 12b pour un *jet* très lumineux observé le 12 février 2020 depuis l'île de la Réunion à 460 km de distance, la valeur du moment de courant est bien plus importante à près de 300 kA km [35]. Toutefois, la variation

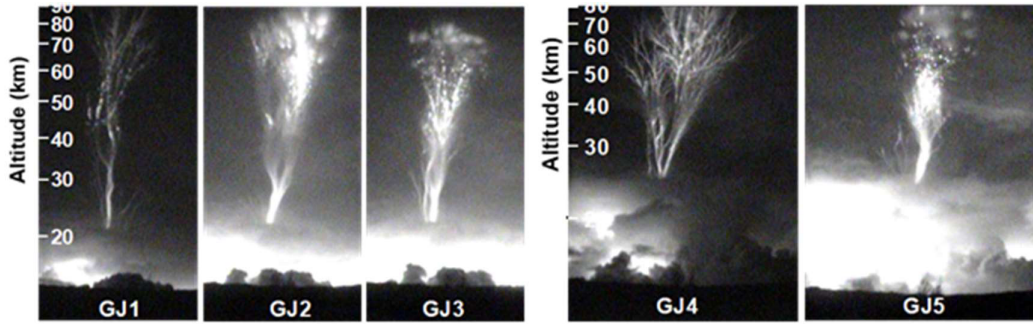


FIGURE 11. Images tirées des vidéos montrant cinq *jets* géants dans leur développement vertical complet et observés à une distance d'environ 50 km. Tiré de [32].

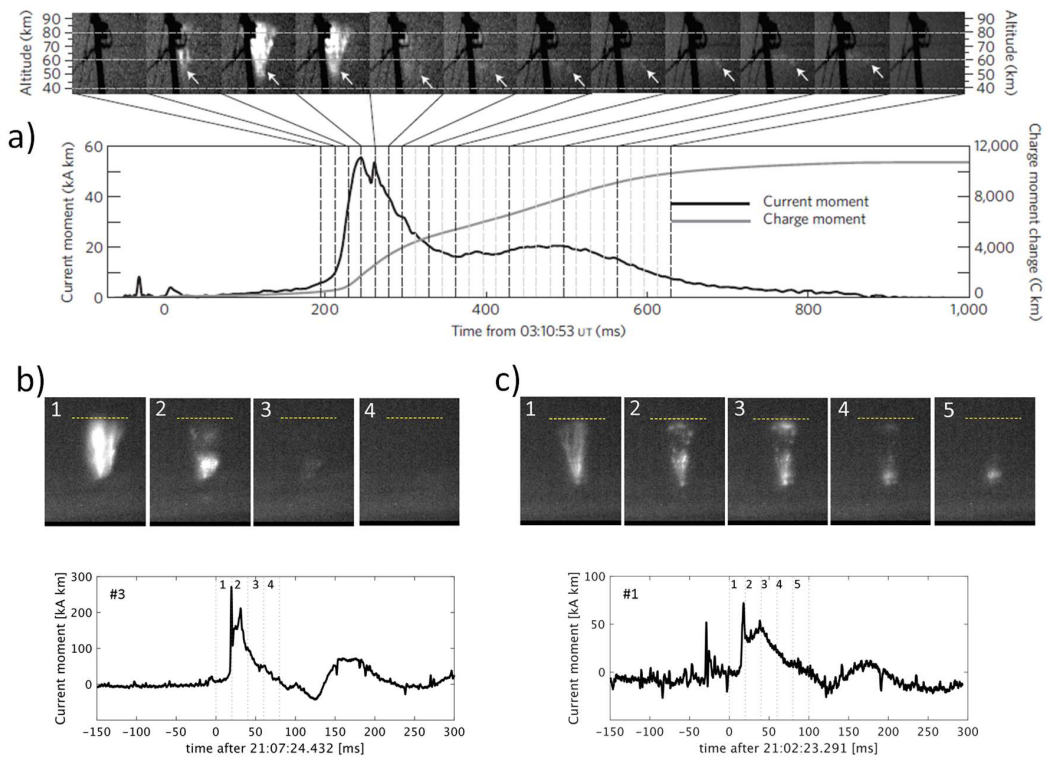


FIGURE 12. Images vidéo successives de *jets* géants avec les évolutions du moment de courant (courbe noire) et du moment de charge (courbe grise) correspondantes : (a) Cas tiré de [33] où les images prises après le maximum sont des moyennes de deux ou quatre champs vidéo individuels, comme indiqué par la fenêtre temporelle de chacun; (b) et (c) deux cas tirés de [35] où les *jets* géants sont filmés à environ 460 km.

du moment de charge estimée en intégrant le moment de courant est de l'ordre de 5 800 C km. Le cas de la Figure 12c produit un moment de courant plus faible. On voit que la luminosité du phénomène est liée au moment de courant produit.



FIGURE 13. Deux photos de *jets* géants : à gauche en Chine le 13 août 2016, © Phebe Pan ; à droite le 7 mars 2009 à l'île de la Réunion, © Patrice Huet.

Les photographies en couleur de *jets* géants (Figure 13) montrent un étagement de couleurs qui correspondent à différents processus de production : la partie inférieure au sommet du nuage présente des similitudes avec l'apparence d'un canal d'éclair classique à haute température émettant de la lumière blanche; la partie intermédiaire se situe dans le bleu correspondant à des émissions dominantes de la molécule d'azote sous l'impact de particules accélérées; dans la partie supérieure le rouge d'autres transitions de la molécule d'azote domine. Les émissions les plus intenses sont émises pendant la phase *trailing jet* qui est celle qui dure le plus. Le *jet* géant démarre dans le nuage chargé entre la charge négative centrale et la charge positive supérieure comme un éclair intranuage positif. La condition pour qu'il émerge du sommet du nuage semble être un déséquilibre entre ces deux zones de charge au profit de la négative [36].

3.4. Les *blue jets* et les *blue starters*

Les phénomènes de *blue jets* et *blue starters* ont un point commun avec les *jets* géants dans la mesure où ils émergent du sommet du nuage, jusqu'à des altitudes de 40 km environ pour le premier et 25 km environ pour le deuxième [15,16,37], mais ils ne viennent pas de la même région du nuage car ils transportent de la charge positive vers le haut. Les *blue jets* se présentent comme d'étroits cônes de lumière bleue (Figure 14). Leurs vitesses apparentes sont comprises entre 10 et 100 km/s. La modélisation indique que les *blue jets* se produisent à la suite d'un déséquilibre entre la charge supérieure du nuage (positive) et la charge écran au-dessus (négative) attirée vers le sommet du nuage [36]. Les *blue starters* ne correspondent pas à des phases initiales de *blue jets*. L'observation d'un *blue starter* photographié au-dessus d'un orage dans le centre-ouest du Nouveau-Mexique (USA) a fait l'objet d'un article [38]. Il a été conclu qu'il s'initiait aussi entre la charge positive supérieure du nuage et une couche de charge négative à son sommet, se propageant sous forme de décharge bidirectionnelle avec davantage de sources VHF émises dans la partie descendante tout au long de la charge positive, ce qui suggère un leader négatif, tandis que le leader ascendant était un faible émetteur de sources VHF et donc positif.



FIGURE 14. Illustration d'un *blue jet* photographié au-dessus d'un orage depuis l'île de la Réunion par Patrice Huet en mars 1997.

4. Conclusion

La recherche dans les dernières décennies sur les TLEs nous a révélé un pan de la physique de l'orage qui avait été évoqué dans plusieurs travaux théoriques mais qui souffrait d'un manque de données expérimentales. Les campagnes d'observations et les stations équipées d'instruments ont montré que ces phénomènes étaient fréquents et présents dans plusieurs régions de la Terre. La classification principale distingue les sprites qui sont généralement associés aux éclairs nuage-sol positifs dans les régions stratiformes des orages, les Elves produits par des éclairs nuage-sol des deux signes près de la région convective, les *jets* géants plus rares et générés le plus souvent par des orages en zone tropicale, les *blue jets* et les *blue starters* qui se distinguent par l'altitude qu'ils atteignent.

Ces décharges contribuent au circuit électrique global c'est-à-dire aux mouvements de charge dans le système Terre. Ce sont des mouvements liés à des décharges et donc à des mouvements rapides qui mettent en jeu des forts courants avec un impact sur leur environnement direct sur les plans de la chimie et du bilan d'énergie. L'observation de ces phénomènes, notamment depuis l'espace avec la station spatiale internationale (ISS), élargit notre connaissance des orages et pose un regard nouveau sur les manifestations électriques au sommet du nuage d'orage. Des observations récentes montrent une activité spécifique au sommet des orages fortement actifs, qui se traduit par des décharges très locales. D'autres observations montrent que l'orage produit des rayonnements de très grande énergie et des accélérations de particules dignes de celles des grands instruments voués à cela.

Déclaration d'intérêts

L'auteur ne travaille pas, ne conseille pas, ne possède pas de parts, ne reçoit pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'a déclaré aucune autre affiliation que son organisme de recherche.

Références

- [1] S. SOULA, « Electrical environment in a storm cloud », *J. AerospaceLab* **5** (2012), p. 1-10. Online at <https://aerospacelab.onera.fr/en/al5/electrical-environment-in-a-storm-cloud>.
- [2] C. P. R. SAUNDERS, « Charge separation mechanisms in clouds », *Space Sci. Rev.* **137** (2008), p. 335-353.
- [3] M. STOLZENBURG, W. D. RUST et T. C. MARSHALL, « Electrical structure in thunderstorm convective regions, 3. Synthesis », *J. Geophys. Res.* **103** (1998), p. 14097-14108.
- [4] M. A. UMAN, *Lightning. Advanced Physics*, Monograph series, McGraw-Hill: New York, 1969.
- [5] B. VONNEGUT, « Cloud-to-stratosphere lightning », *Weather* **35** (1980), p. 59-60.
- [6] O. H. VAUGHAN JR. et B. VONNEGUT, « Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the air above », *J. Geophys. Res.* **94** (1989), article no. 13179.
- [7] R. C. FRANZ, R. J. NEMZEK et J. R. WINCKLER, « Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system », *Science* **249** (1990), p. 48-51.
- [8] W. A. LYONS, « Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video », *Geophys. Res. Lett.* **21** (1994), no. 10, p. 875-878.
- [9] C. T. R. WILSON, « The electric field of a thunderstorm and some of its effects », *Proc. R. Soc. Lond.* **37** (1925), p. 32D.
- [10] W. L. BOECK, O. H. VAUGHAN, R. BLAKESLEE, B. VONNEGUT et M. BROOK, « Lightning induced brightening in the airglow layer », *Geophys. Res. Lett.* **19** (1992), no. 2, p. 99-102.
- [11] H. FUKUNISHI, Y. TAKAHASHI, A. UCHIDA, M. SERA, K. ADACHI et R. MIYASATO, « Occurrences of Sprites and Elves above the sea of Japan near Hokuriku in winter », *EOS Suppl.* **80** (1999), no. 46, article no. F217. Abstract.
- [12] O. H. VAUGHAN JR., R. BLAKESLEE, W. L. BOECK, B. VONNEGUT, M. BROOK et J. MCKUNE JR., « A cloud-to-space lightning as recorded by the Space Shuttle payload-bay TV cameras », *Mon. Weath. Rev.* **120** (1992), p. 1459-1461.
- [13] D. D. SENTMAN et E. M. WESCOTT, « Video observations of upper atmosphere optical flashes recorded from an aircraft », *Geophys. Res. Lett.* **20** (1993), p. 2857-2860.
- [14] D. D. SENTMAN, E. M. WESCOTT, D. L. OSBORNE, D. L. HAMPTON et M. J. HEAVNER, « Preliminary results from the Sprites 94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites », *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995), p. 1205-1208.
- [15] E. M. WESCOTT, D. SENTMAN, D. OSBORNE, D. HAMPTON et M. HEAVNER, « Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 2. Blue jets », *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995), no. 10, p. 1209-1212.
- [16] E. M. WESCOTT, D. D. SENTMAN, M. J. HEAVNER, D. L. HAMPTON, D. L. OSBORNE et O. H. VAUGHAN JR., « Blue starters : Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm », *Geophys. Res. Lett.* **23** (1996), no. 16, p. 2153-2156.
- [17] S. F. HARDMAN, R. L. DOWDEN, J. B. BRUNDELL, J. L. BAHR, Z. KAWASAKI et C. J. RODGER, « Sprite observations in the northern territory of Australia », *J. Geophys. Res.* **105** (2000), no. D4, p. 4689-4697.
- [18] T. NEUBERT, T. H. ALLIN, H. STEBAEK-NIELSEN et E. BLANC, « Sprites over Europe », *Geophys. Res. Lett.* **28** (2001), p. 3585-3588.
- [19] E. BLANC, T. FARGES, R. ROCHE, D. BREBION, T. HUA, A. LABARTHE et V. MELNIKOV, « Nadir observations of sprites from the International Space Station », *J. Geophys. Res.* **109** (2004), article no. A02306.
- [20] V. PASKO, U. INAN, T. BELL et Y. TARANENKO, « Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere », *J. Geophys. Res.* **102** (1997), no. A3, p. 4529-4561.
- [21] M. STANLEY, P. KREHBIEL, M. BROOK, C. MOORE, W. RISON et B. ABRAHAMS, « High speed video of initial sprite development », *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999), p. 3201-3204.
- [22] V. P. PASKO, M. A. STANLEY, J. D. MATHEWS, U. S. INAN et T. G. WOOD, « Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere », *Nature* **416** (2002), p. 152-154.
- [23] J. BÓR, « Optically perceptible characteristics of sprites observed in Central Europe in 2007-2009 », *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **92** (2013), p. 151-177.
- [24] S. SOULA, F. IACOVELLA, O. VAN DER VELDE et al., « Multi-instrumental analysis of large sprite events and their producing storm in southern France », *Atmos. Res.* **135** (2014), p. 415-431.
- [25] W. A. LYONS, « Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems », *J. Geophys. Res.* **101** (1996), p. 29641-29652.
- [26] C. P. BARRINGTON-LEIGH, U. S. INAN, M. STANLEY et S. A. CUMMER, « Sprites triggered by negative lightning discharges », *Geophys. Res. Lett.* **26** (1999), no. 24, p. 3605-3608.

- [27] O. A. VAN DER VELDE, Á. MIKA, S. SOULA, C. HALDOUPIS, T. NEUBERT et U. S. INAN, « Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes », *J. Geophys. Res.* **111** (2006), article no. D15203.
- [28] S. B. MENDE, R. L. RAIRDEN, G. R. SWENSON et W. A. LYONS, « Sprite spectra; N2 1 PG band identification », *Geophys. Res. Lett.* **22** (1995), no. 19, p. 2633-2636.
- [29] S. A. CUMMER et W. A. LYONS, « Implication of lightning charge moment changes for sprite initiation », *J. Geophys. Res.* **110** (2005), article no. A04304.
- [30] Y. N. TARANENKO, U. S. INAN et T. F. BELL, « The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning : Excitation of optical emissions », *Geophys. Res. Lett.* **20** (1993), no. 23, p. 2675-2678.
- [31] R. A. MARSHALL, U. S. INAN et V. S. GLUKHOV, « Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges », *J. Geophys. Res.* **115** (2010), article no. A00E17.
- [32] S. SOULA, O. VAN DER VELDE, J. MONTANYA, P. HUET, C. BARTHE et J. BÓR, « Gigantic jets produced by an isolated tropical thunderstorm near Réunion Island », *J. Geophys. Res.* **116** (2011), article no. D19103.
- [33] S. A. CUMMER, J. LI, F. HAN, G. LU, N. JAUGEY, W. A. LYONS et T. E. NELSON, « Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet », *Nat. Geosci.* **2** (2009), no. 9, p. 617-620.
- [34] V. A. RAKOV et M. A. UMAN, *Lightning : Physics and Effects*, Cambridge University Press: Cambridge, 2003.
- [35] S. SOULA, J. MLYNARCZYK, O. VAN DER VELDE, J. MONTANYA et E. LECLERC, « High production of gigantic jets by a thunderstorm over Indian Ocean », *J. Geophys. Res.* **128** (2023), article no. e2023JD039486.
- [36] P. R. KREHBIEL, J. A. RIOUSSET, V. P. PASKO, R. J. THOMAS, W. RISON, M. A. STANLEY et H. E. EDENS, « Upward lectrical discharges from thunderstorms », *Nat. Geosci.* **1** (2008), no. 4, p. 233-237.
- [37] T. NEUBERT, O. CHANRION, M. HEUMESSER, K. DIMITRIADOU, L. HUSBJERG, I. L. RASMUSSEN, N. ØSTGAARD et V. REGLERO, « Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere », *Nature* **589** (2021), no. 7842, p. 371-375.
- [38] H. E. EDENS, « Photographic and lightning mapping observations of a blue starter over a New Mexico thunders-torm », *Geophys. Res. Lett.* **38** (2011), article no. L17804.