

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



© Harald Edens

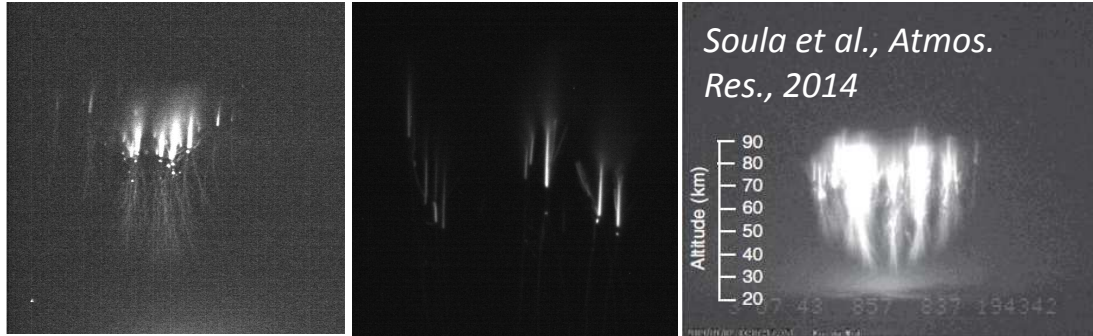
www.cea.fr

Phénomènes lumineux transitoires : observations et mécanismes physiques

Thomas FARGES
CEA, DAM, DIF

*Colloque du PNST
14-16 mars 2016*

Sprites vus depuis le Pic du Midi avec caméra classique

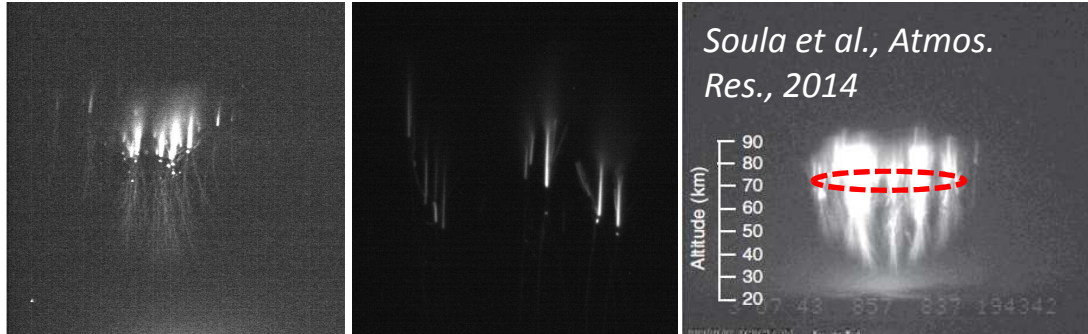


Carotte

Colonne

Méduse

Sprites vus depuis le Pic du Midi avec caméra classique



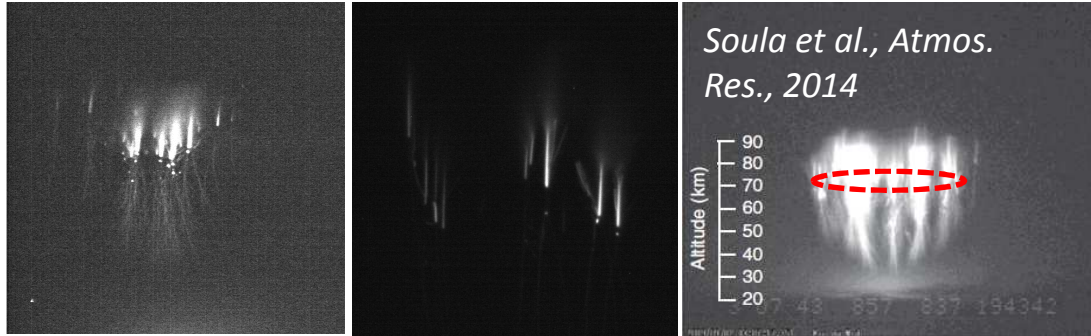
Carotte

Colonne

Méduse

- Organisation spatiale des sprites : circulaire
- Aussi brillant que Jupiter : 10-100 GR (50 μ s)
- Durée : 1-5 ms

Sprites vus depuis le Pic du Midi avec caméra classique



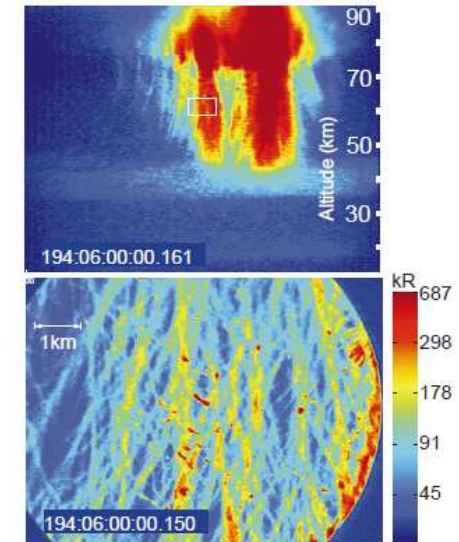
Carotte

Colonne

Méduse

- Organisation spatiale des sprites : circulaire
- Aussi brillant que Jupiter : 10-100 GR (50 μ s)
- Durée : 1-5 ms

avec un télescope

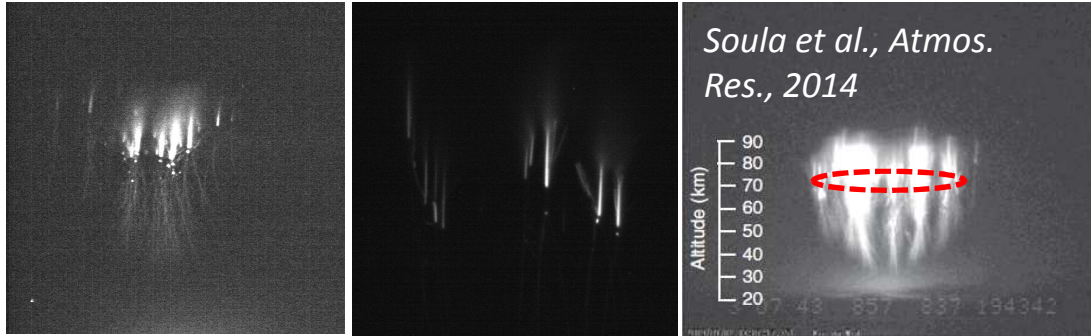


Gerken et al., GRL, 2000

Dimension

- verticale: 40 – 90 km
- transverse :
 - Carotte : jusqu'à 20 km
 - Colonne : dizaines de mètre

Sprites vus depuis le Pic du Midi avec caméra classique



Carotte

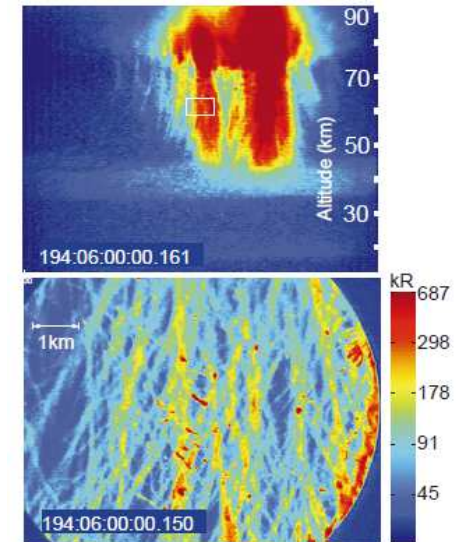
Colonne

Méduse

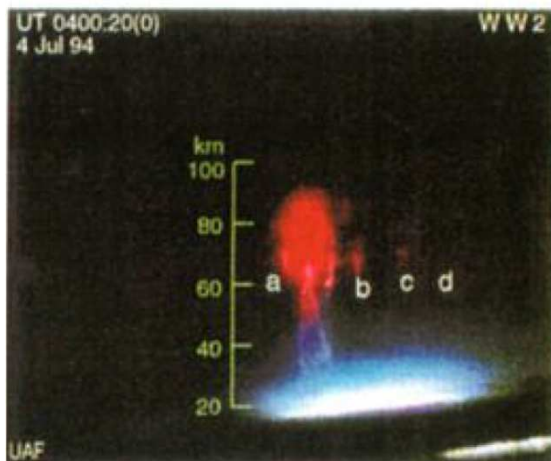
Soula et al., Atmos. Res., 2014

- Organisation spatiale des sprites : circulaire
- Aussi brillant que Jupiter : 10-100 GR (50 μ s)
- Durée : 1-5 ms

avec un télescope



Gerken et al., GRL, 2000

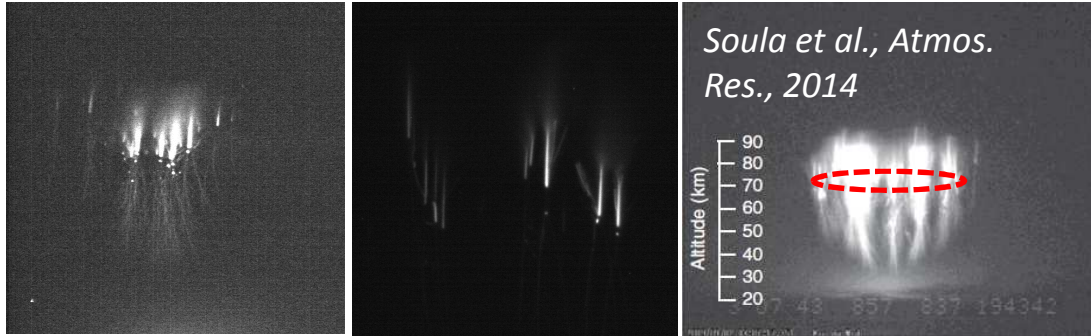


Sentman et al., GRL, 1995

Dimension

- verticale: 40 – 90 km
- transverse :
 - Carotte : jusqu'à 20 km
 - Colonne : dizaines de mètre

Sprites vus depuis le Pic du Midi avec caméra classique



Carotte

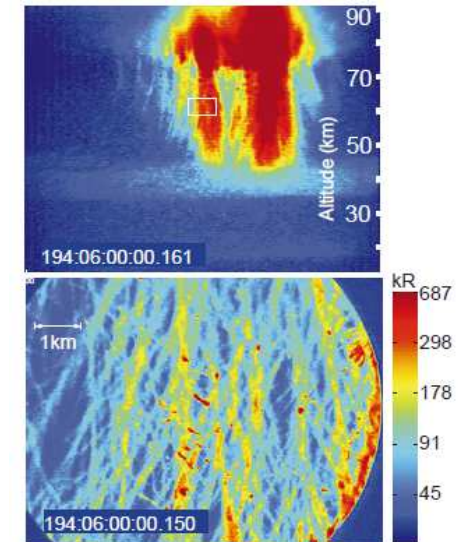
Colonne

Méduse

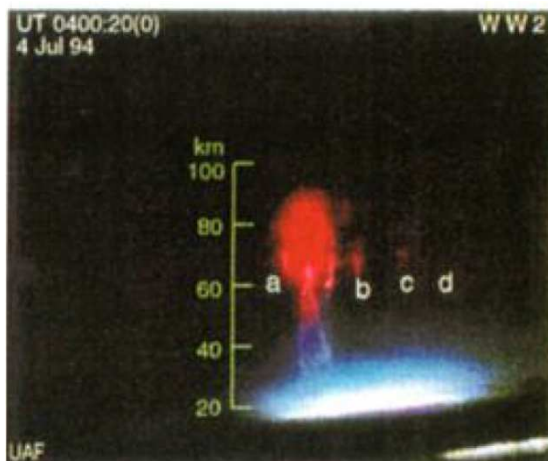
Soula et al., Atmos. Res., 2014



avec un télescope



Gerken et al., GRL, 2000



Sentman et al., GRL, 1995

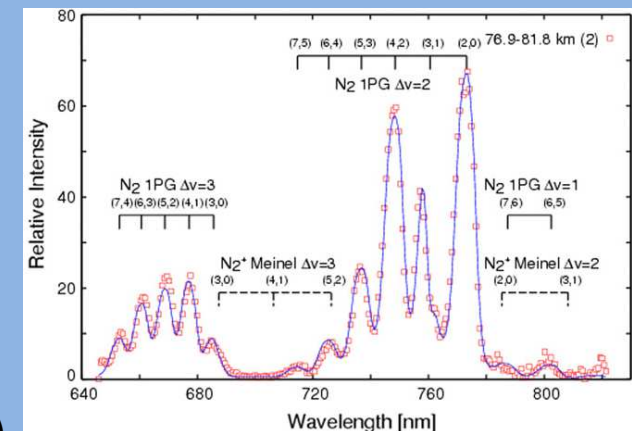
Spectre :

Excitation de N_2 :

- NIR : N_2 1P
- UV-bleu : N_2 2P
- FUV : LBH

Ionisation N_2^+ : bleu

➔ Confirmation depuis l'espace pour FUV (ISUAL)



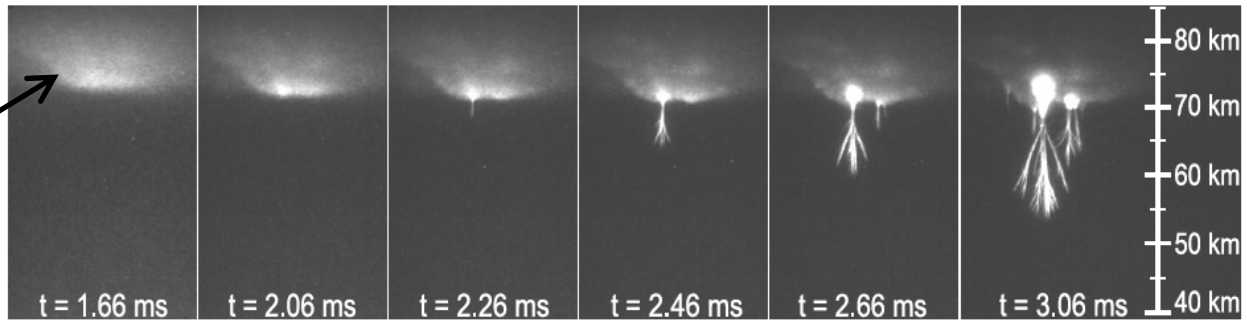
Kanmae et al., GRL, 2007

Sprites : filament = streamer

Impact de l'augmentation de la cadence image

Altitude d'initiation : 75-85 km
à l'intérieur du halo

Halo



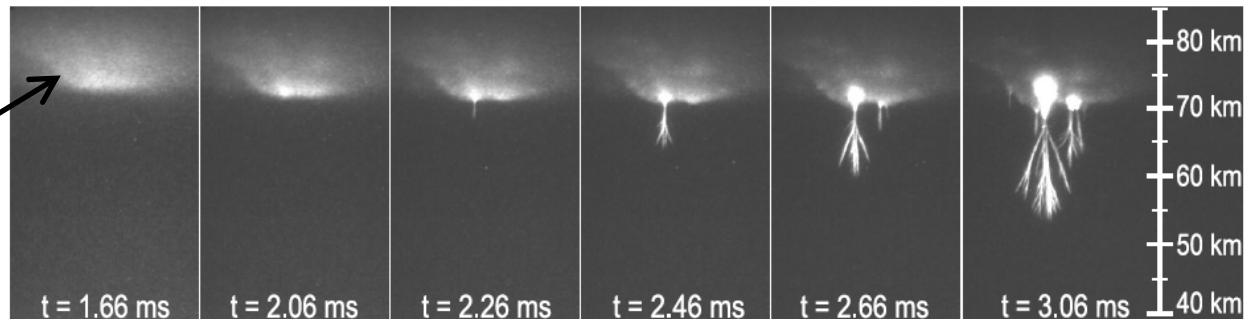
Cummer et al., GRL, 2006

Sprites : filament = streamer

Impact de l'augmentation de la cadence image

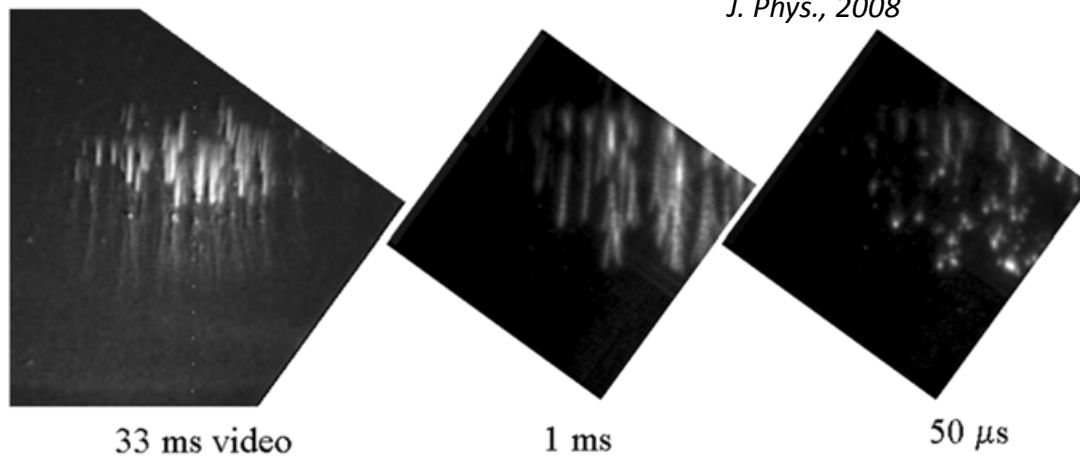
Altitude d'initiation : 75-85 km
à l'intérieur du halo

Halo



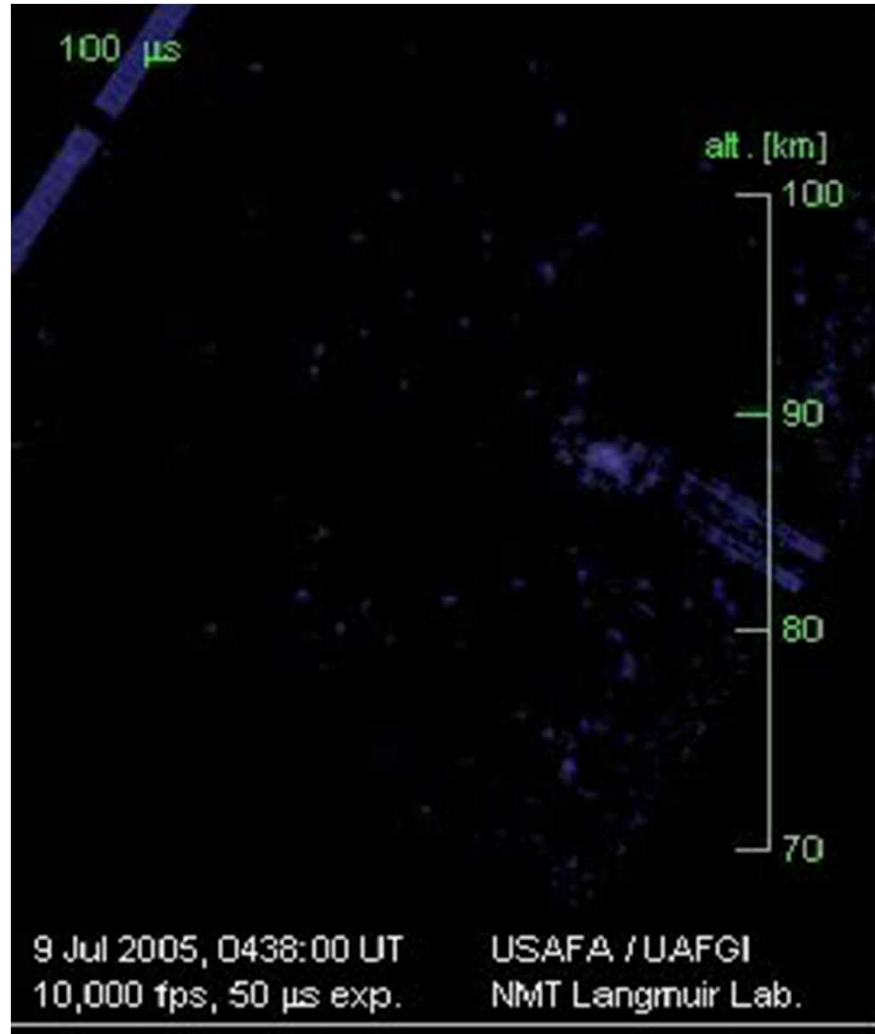
Cummer et al., GRL, 2006

*Stenbaek-Nielsen and McHarg,
J. Phys., 2008*



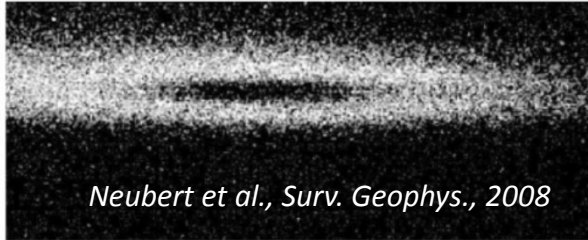
La forme du filament n'est due qu'au temps de pose long vis-à-vis de la durée du phénomène :

→ en présence d'un streamer : tête très brillante suivi d'une queue (« afterglow »)



Durée réelle = 9 ms

Elves



Neubert et al., Surv. Geophys., 2008

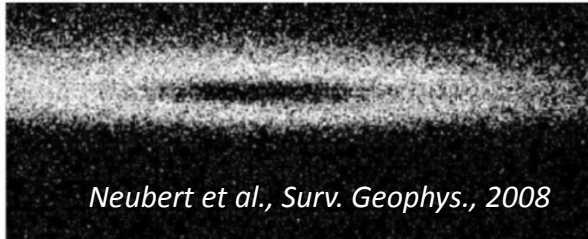
Elve at 22 July 2003, 21:51:05.038 UT

Durée : ~ 1ms

Extension horizontale : 300 km

Altitude : 85-95 km

Elves



Neubert et al., Surv. Geophys., 2008

Elve at 22 July 2003, 21:51:05.038 UT

Durée : ~ 1ms

Extension horizontale : 300 km

Altitude : 85-95 km

Blue jets

Durée : dizaines de ms

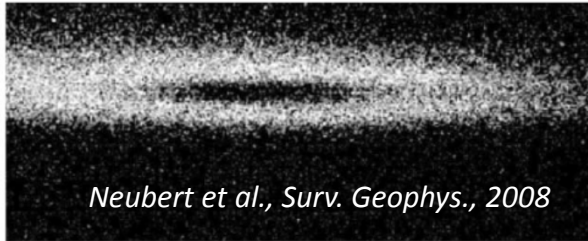
Altitude : 15-35 km



Wescott et al., JGR., 2001

Elves, blue jets et gigantic jets

Elves



Neubert et al., Surv. Geophys., 2008

Elve at 22 July 2003, 21:51:05.038 UT

Durée : ~ 1ms

Extension horizontale : 300 km

Altitude : 85-95 km

Blue jets

Durée : dizaines de ms

Altitude : 15-35 km



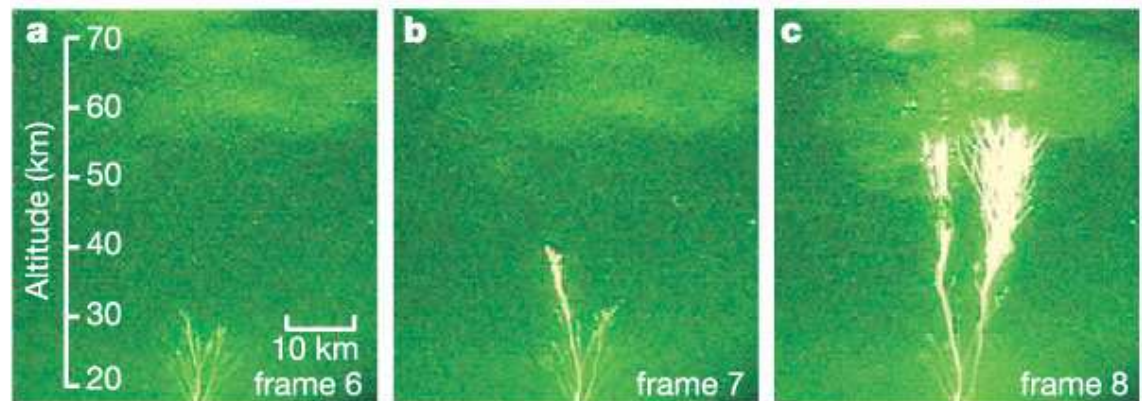
Wescott et al., JGR., 2001

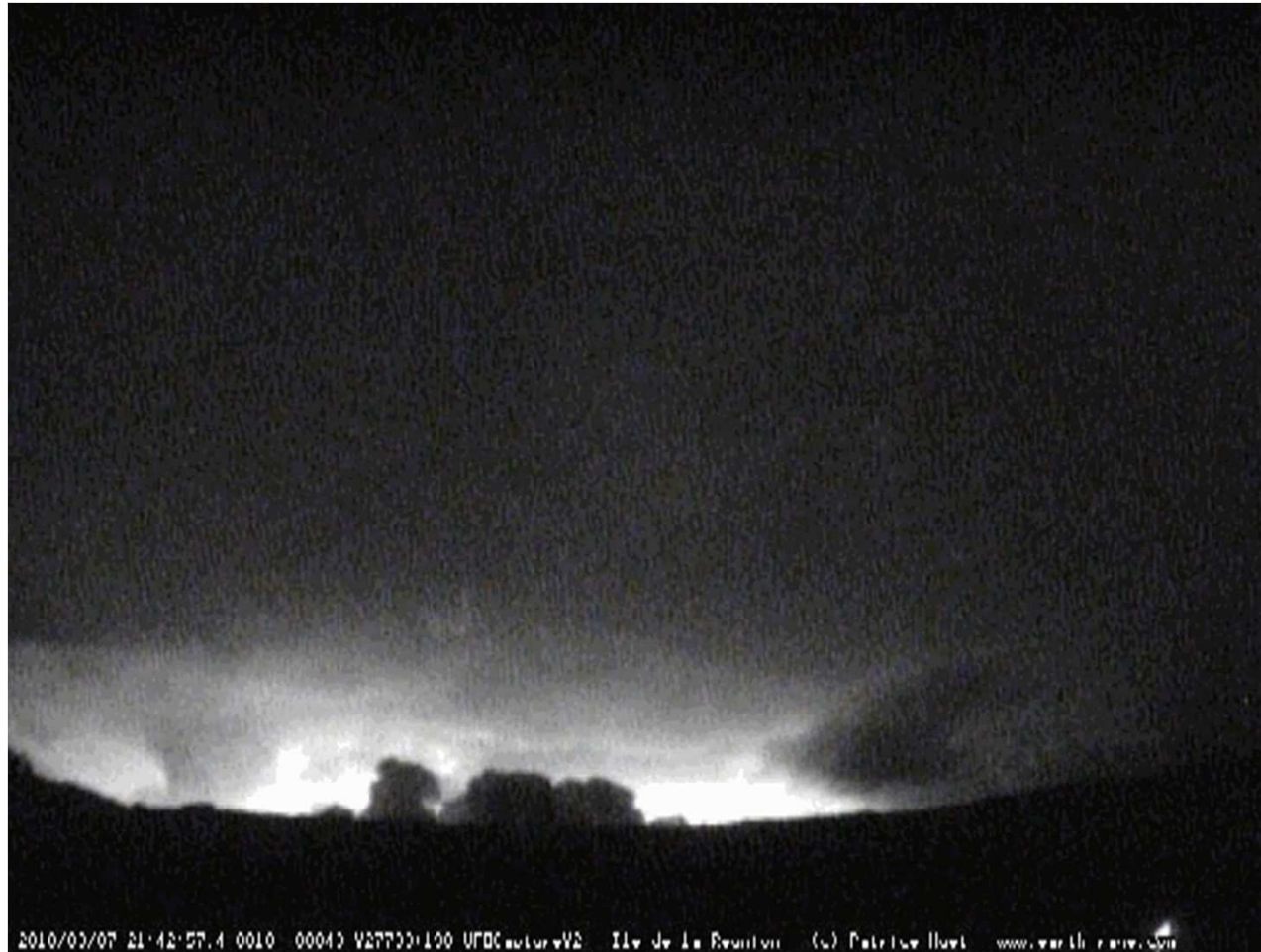
Pasko et al., Nature, 2002

Gigantic jets

Durée : plusieurs centaines de ms

Altitude : 20-90 km





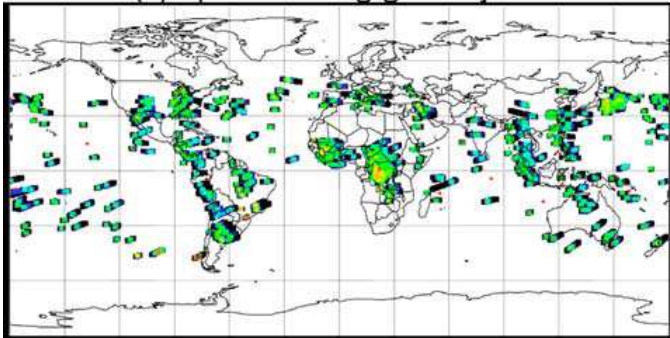
Observation d'un jet géant depuis la Réunion

Durée réelle = 0,3 s

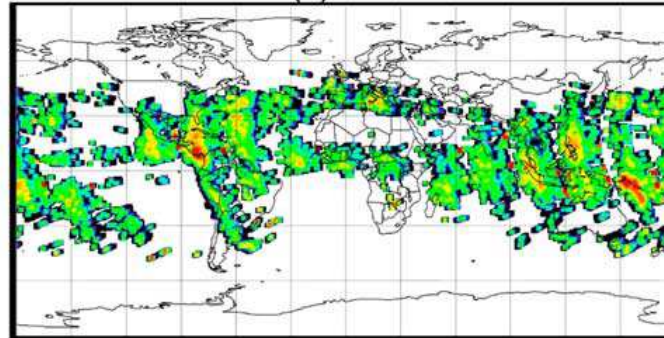
Soula et al., JGR, 2011

Occurrence des TLEs et répartition spatiale

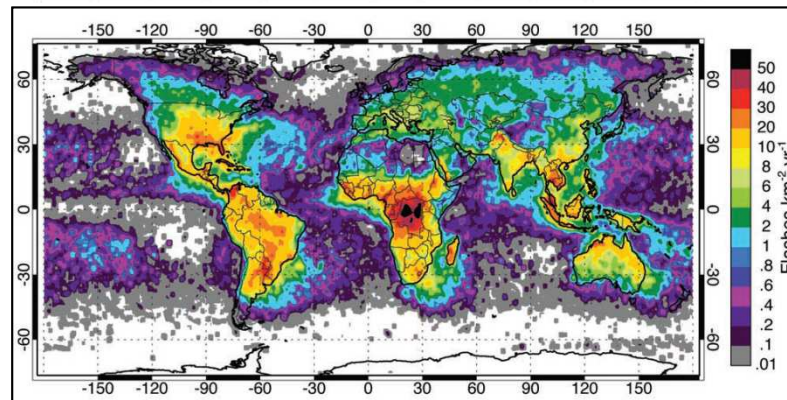
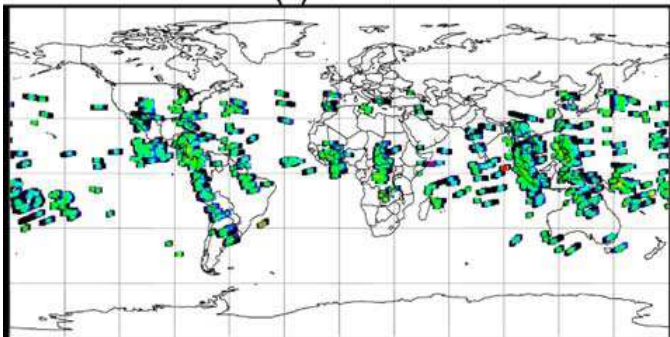
(a) sprites and gigantic jets



(b) elves



(c) halos



A partir des observations de ISUAL sur FORMOSAT-2

Chen et al., JGR, 2008

A partir des observations de LIS sur TRMM

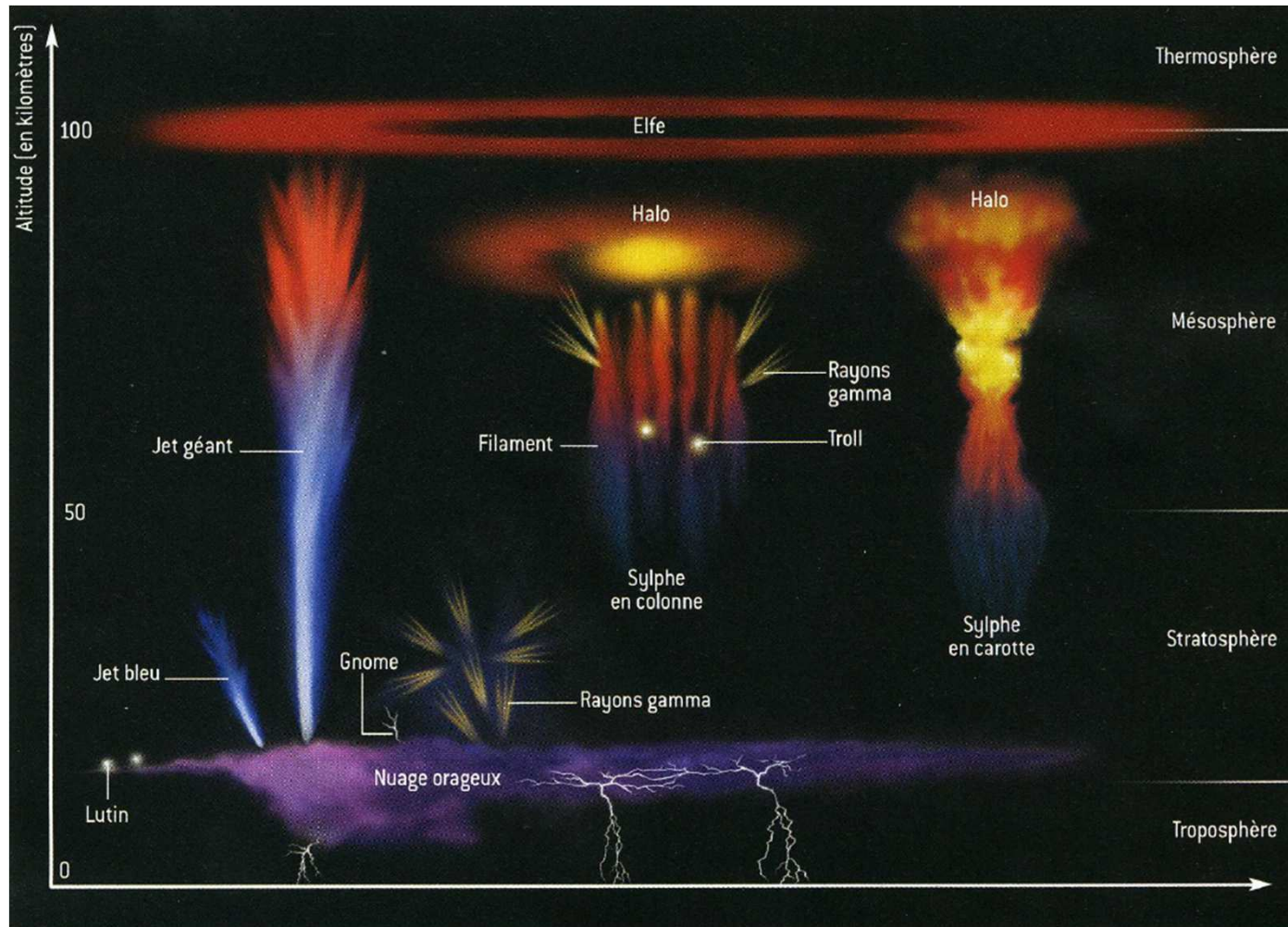
Christian et al., JGR, 2003

Year	Elves	Sprites	Halos	Blue Jets	Gigantic Jets	Total
2004/07-2014/05	25,998	2,300	2,043	4,720	104	35,165
Total (%)	(73.93%)	(6.54%)	(5.81%)	(13.42%)	(0.30%)	(100%)

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-2#mission-status>

Occurrence des TLEs :

- Elve : 3.23 / minute
 - Sprite : 0.5 / minute
 - Halo : 0.39 / minute
 - gigantic jet 0.01 / minute
- à comparer à celle des éclairs : 2640 / minute (44/s)



*Blanc et Farges,
Pour la Science,
2012*

Tous ont lieu pendant les épisodes orageux importants.

3 grands types de TLE → 3 mécanismes physiques différents

Observations complémentaires pour la compréhension des TLEs

L'étude et l'analyse des TLE nécessitent différents types d'instrument en plus des mesures optique [**caméra** (cadence vidéo classique à très élevée), photomètre, spectromètre]

Paramètres dérivés de l'optique :

- Date
- Position géographique et altitude : plus précises si triangulation
- Type de TLE
- Dimensions
- Vitesse
- Origine des émissions (spectroscopie)

- Occurrence, climatologie des TLE

Observations complémentaires pour la compréhension des TLEs

L'étude et l'analyse des TLE nécessitent différents types d'instrument en plus des mesures optique [**caméra** (cadence vidéo classique à très élevée), photomètre, spectromètre]

- Électromagnétique (radio : ELF → VHF) : large bande ou bande étroite
- Autres : radar météo, microbaromètre, ionosonde, ...
- Apport des mesures depuis l'espace : globalisation, absence de filtrage atmosphérique, ...

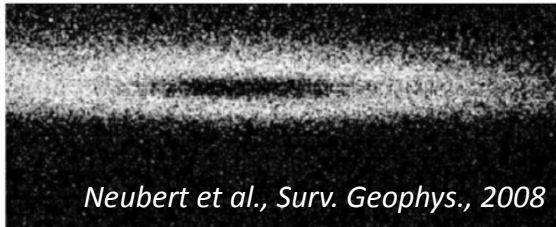
Paramètres dérivés de l'optique :

- Date
- Position géographique et altitude : plus précises si triangulation
- Type de TLE
- Dimensions
- Vitesse
- Origine des émissions (spectroscopie)

- Occurrence, climatologie des TLE

Paramètres dérivés des mesures EM :

- Large bande VLF-LF :
 - date, localisation et caractéristiques des éclairs parents (polarité, courant crête, variation du moment de charge, ...)
 - délai entre éclair et TLE
 - courant dans le sprite (ELF)
- Bande étroite :
 - VLF : ionisation et temps de retour à la normale
 - MF : chauffage électronique
 - VHF : localisation 3D des leaders (LMA)

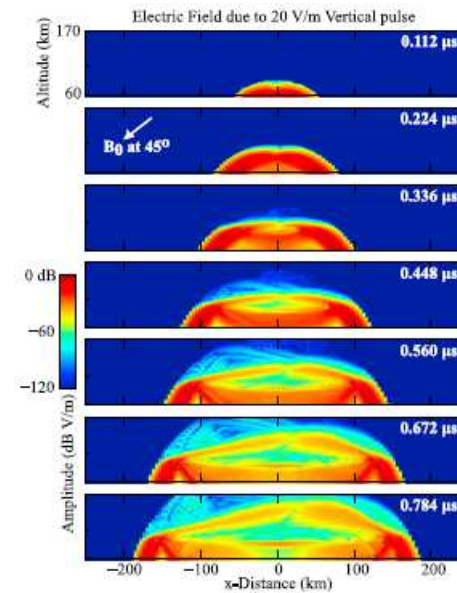


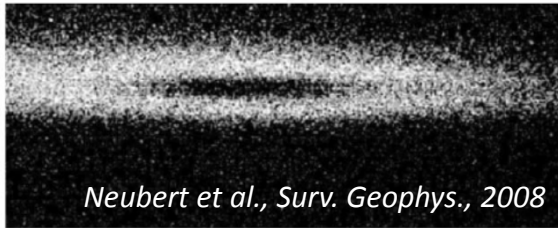
Neubert et al., Surv. Geophys., 2008

Elve at 22 July 2003, 21:51:05.038 UT

Interaction du champ électrique émis par un éclair (équivalent à une antenne verticale dipolaire) avec la base de l'ionosphère induit :

Elve : manifestation haute altitude d'un éclair (comme la foudre ou le tonnerre à basse altitude)





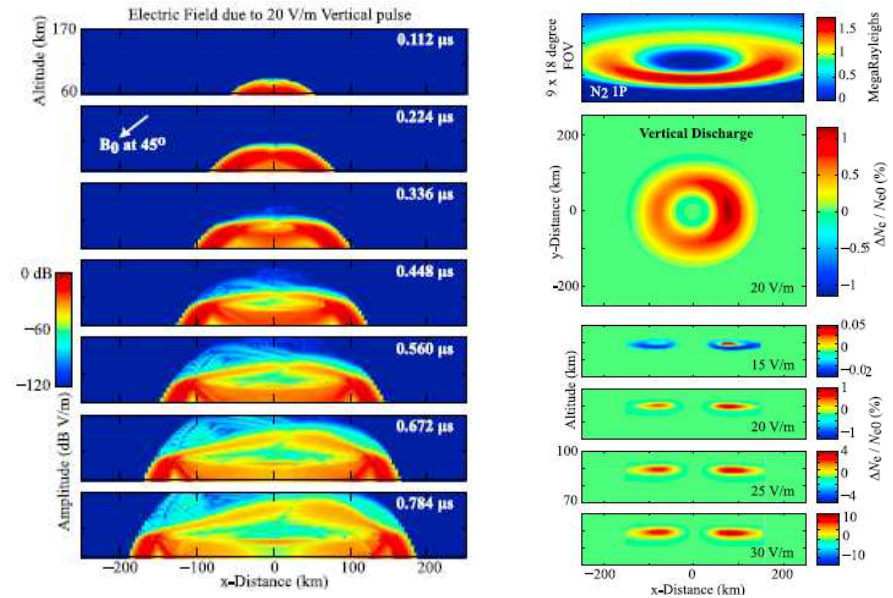
Neubert et al., *Surv. Geophys.*, 2008

Elve at 22 July 2003, 21:51:05.038 UT

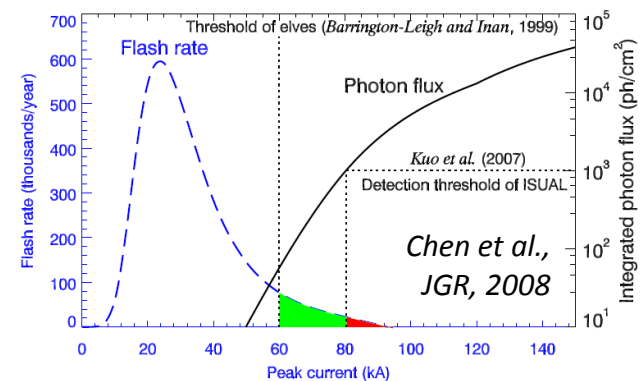
Elve : manifestation haute altitude d'un éclair (comme la foudre ou le tonnerre à basse altitude)

Interaction du champ électrique émis par un éclair (équivalent à une antenne verticale dipolaire) avec la base de l'ionosphère induit :

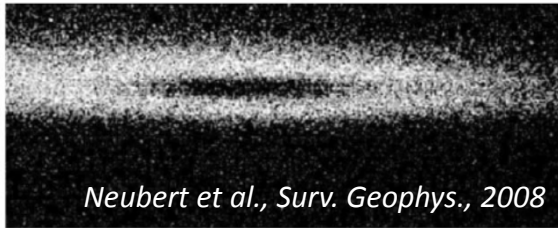
- Formation d'un **tore lumineux** pour tous les éclairs nuage-sol dont le courant crête est > 60 kA (dépend de la sensibilité du capteur optique)



Marshall et al., *JGR*, 2010



Chen et al., *JGR*, 2008



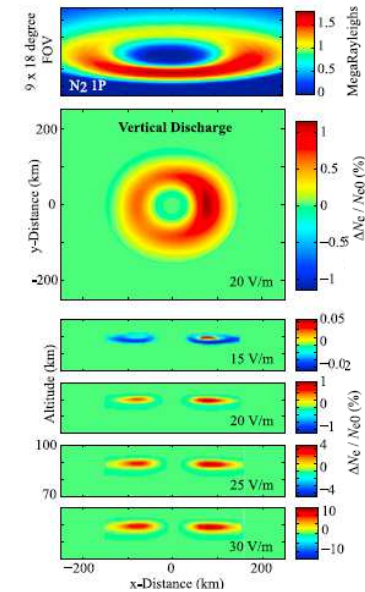
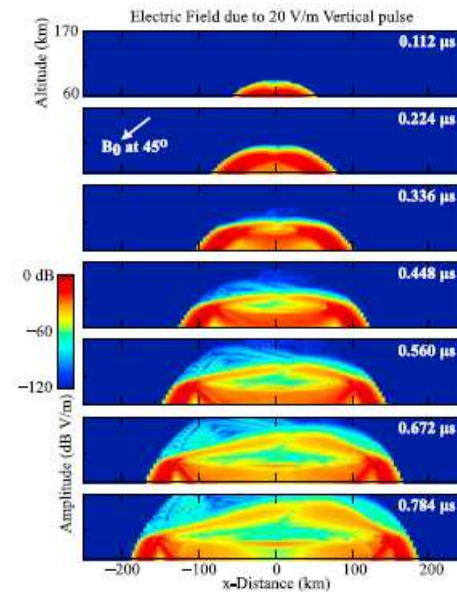
Neubert et al., *Surv. Geophys.*, 2008

Elve at 22 July 2003, 21:51:05 038 UT

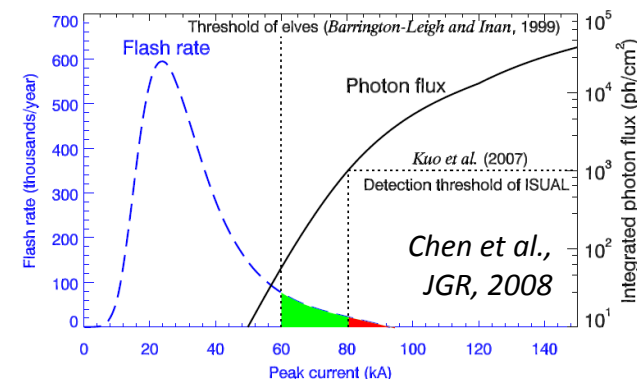
Elve : manifestation haute altitude d'un éclair (comme la foudre ou le tonnerre à basse altitude)

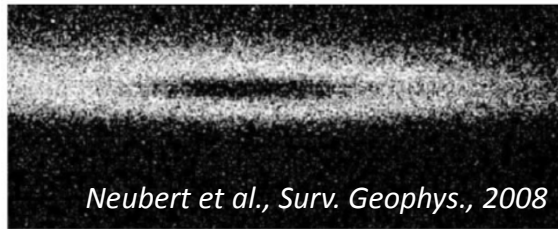
Interaction du champ électrique émis par un éclair (équivalent à une antenne verticale dipolaire) avec la base de l'ionosphère induit :

- Formation d'un **tore lumineux** pour tous les éclairs nuage-sol dont le courant crête est > 60 kA (dépend de la sensibilité du capteur optique)
- Ionisation :
 - forte variation du signal radio VLF avec un long temps de retour (LORE, *Haldoupis et al., JGR, 2013*) pour les éclairs les plus forts (> 200 kA, $> 50\%$ d'occurrence)
 - contribution à l'ionisation régionale nocturne jusqu'à 5% pour les zones très actives (*Chen et al., JGR, 2008*)



Marshall et al., *JGR*, 2010





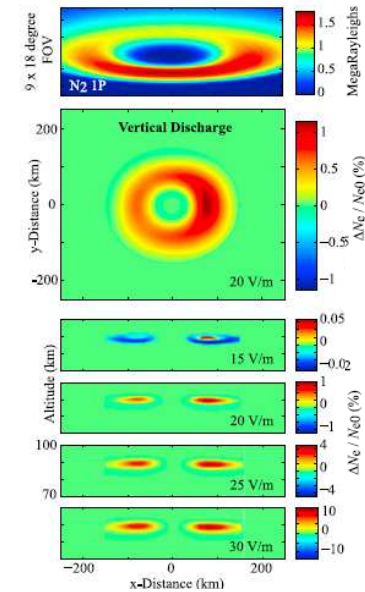
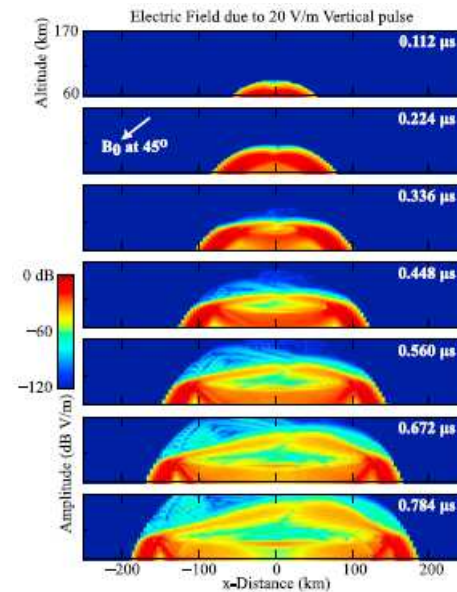
Neubert et al., *Surv. Geophys.*, 2008

Elve at 22 July 2003, 21:51:05 038 UT

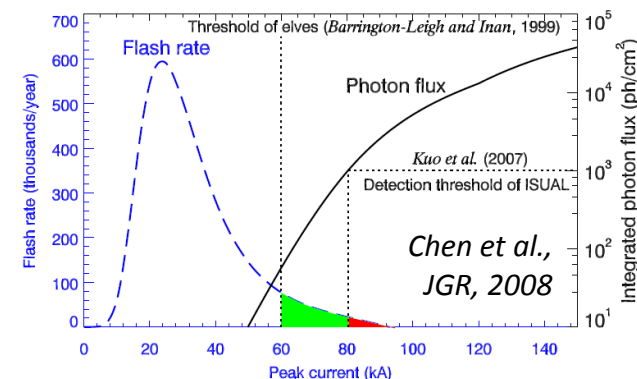
Elve : manifestation haute altitude d'un éclair (comme la foudre ou le tonnerre à basse altitude)

Interaction du champ électrique émis par un éclair (équivalent à une antenne verticale dipolaire) avec la base de l'ionosphère induit :

- **Formation d'un tore lumineux** pour tous les éclairs nuage-sol dont le courant crête est > 60 kA (dépend de la sensibilité du capteur optique)
- **Ionisation :**
 - forte variation du signal radio VLF avec un long temps de retour (LORE, *Haldoupis et al., JGR, 2013*) pour les éclairs les plus forts (> 200 kA, >50% d'occurrence)
 - contribution à l'ionisation régionale nocturne jusqu'à 5% pour les zones très actives (*Chen et al., JGR, 2008*)
- **Chauffage électronique :** bref (quelques millisecondes) blackout des émissions radio MF (500 kHz – 1600 kHz) (*Farges et al., JGR, 2007*).



Marshall et al., *JGR*, 2010



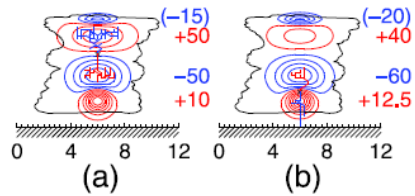
Jets bleus et jets géants

Les jets : des décharges comme celles des éclairs mais vers le haut



Intracloud lightning (IC)

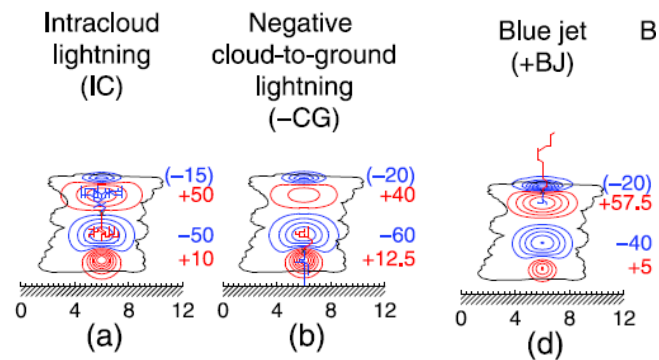
Negative cloud-to-ground lightning (-CG)



Krehbiel et al., Nature Geoscience, 2008

Jets bleus et jets géants

Les jets : des décharges comme celles des éclairs mais vers le haut



Krehbiel et al., Nature Geoscience, 2008

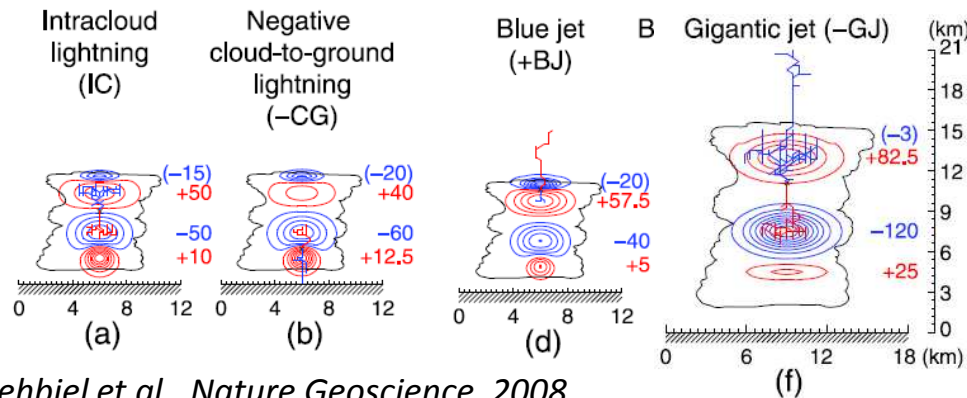
- Les jets bleus se produisent après une décharge nuage-sol ou intra-nuage et sont dus au rééquilibrage après ce soudain déséquilibre dans la structure des charges.

Jets bleus et jets géants

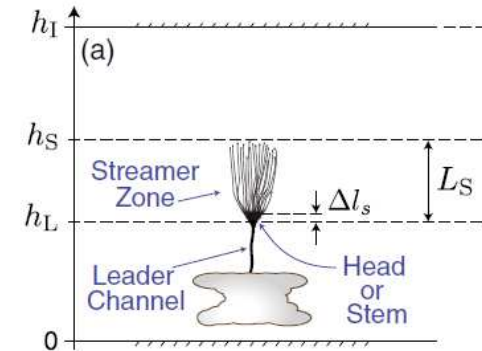
Les jets : des décharges comme celles des éclairs mais vers le haut



van der Velde et al., JGR, 2010



Krehbiel et al., Nature Geoscience, 2008



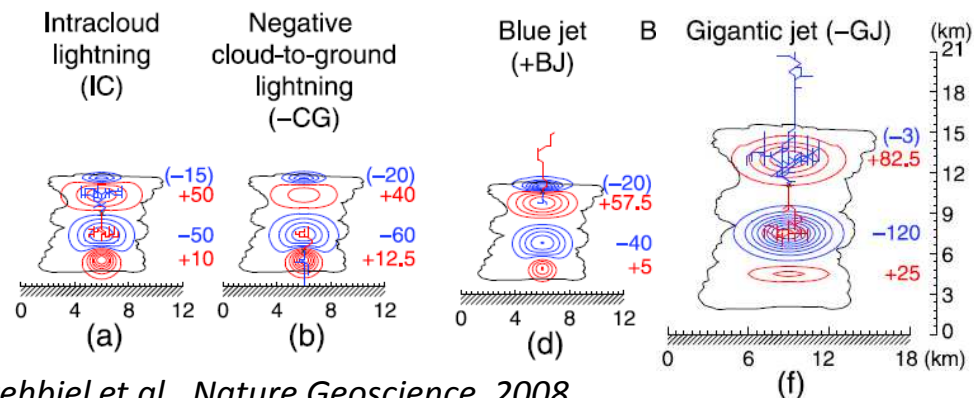
Da Silva and Pasko, GRL, 2013

- Les jets bleus se produisent après une décharge nuage-sol ou intra-nuage et sont dus au rééquilibrage après ce soudain déséquilibre dans la structure des charges.
- Un leader arrive à s'échapper et progresse jusqu'à une altitude où il ne peut plus progresser dans ce mode (30 à 50 km selon la différence de potentiel). Il peut se transformer alors en streamer et progresser jusqu'à l'ionosphère.

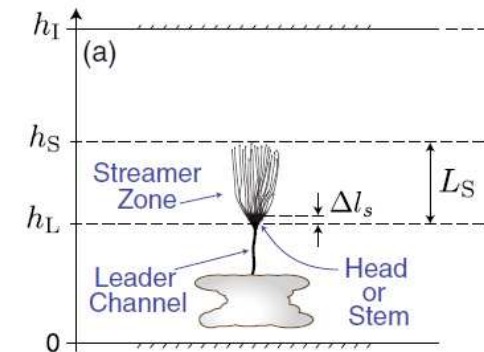
Les jets : des décharges comme celles des éclairs mais vers le haut



van der Velde et al., JGR, 2010



Krehbiel et al., Nature Geoscience, 2008

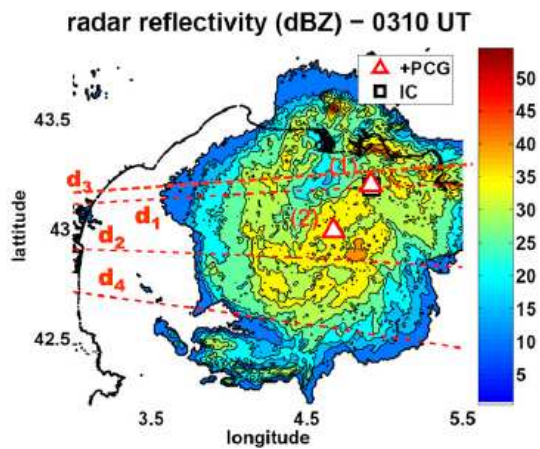


Da Silva and Pasko, GRL, 2013

- Les jets bleus se produisent après une décharge nuage-sol ou intra-nuage et sont dus au rééquilibrage après ce soudain déséquilibre dans la structure des charges.
- Un leader arrive à s'échapper et progresse jusqu'à une altitude où il ne peut plus progresser dans ce mode (30 à 50 km selon la différence de potentiel). Il peut se transformer alors en streamer et progresser jusqu'à l'ionosphère.
- La plupart des jets géants transportent des centaines de Coulomb de charge négative, à comparer aux éclairs nuage-sol typiques qui est de quelques dizaines de Coulomb.

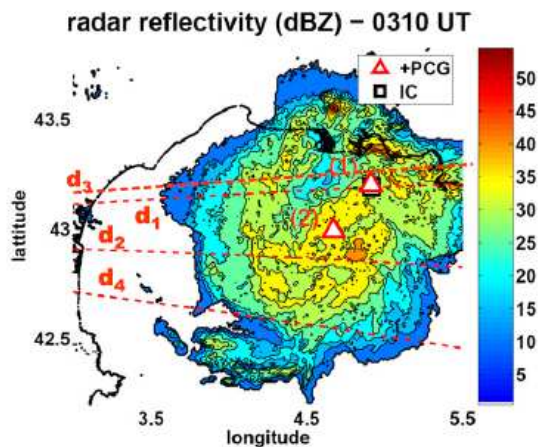
Sprites : condition d'apparition

Après arc en retour positif (+CG), au
dessus de la région stratiforme des
systèmes ou des complexes convectifs de
moyenne échelle (MCS et MCC)



Sprites : condition d'apparition

Après arc en retour positif (+CG), au dessus de la région stratiforme des systèmes ou des complexes convectifs de moyenne échelle (MCS et MCC)



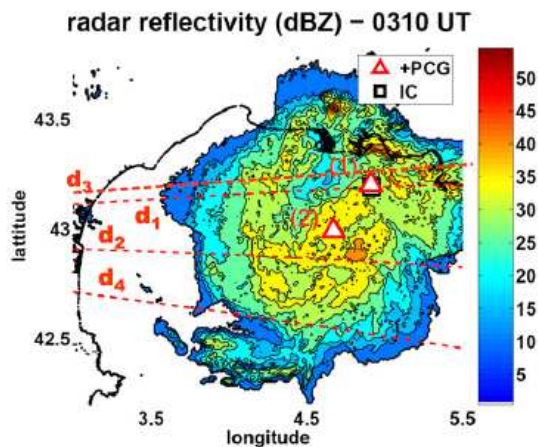
Ecart temporel éclair parent / TLE :

- Halo : < qq millisecondes
- Colonne : < 30 ms
- Carotte : jusqu'à 200 ms
- Fortement retardé : > 10 ms

Ecart spatial avec +CG : en moyenne de 40 km

Sprites : condition d'apparition

Après arc en retour positif (+CG), au dessus de la région stratiforme des systèmes ou des complexes convectifs de moyenne échelle (MCS et MCC)



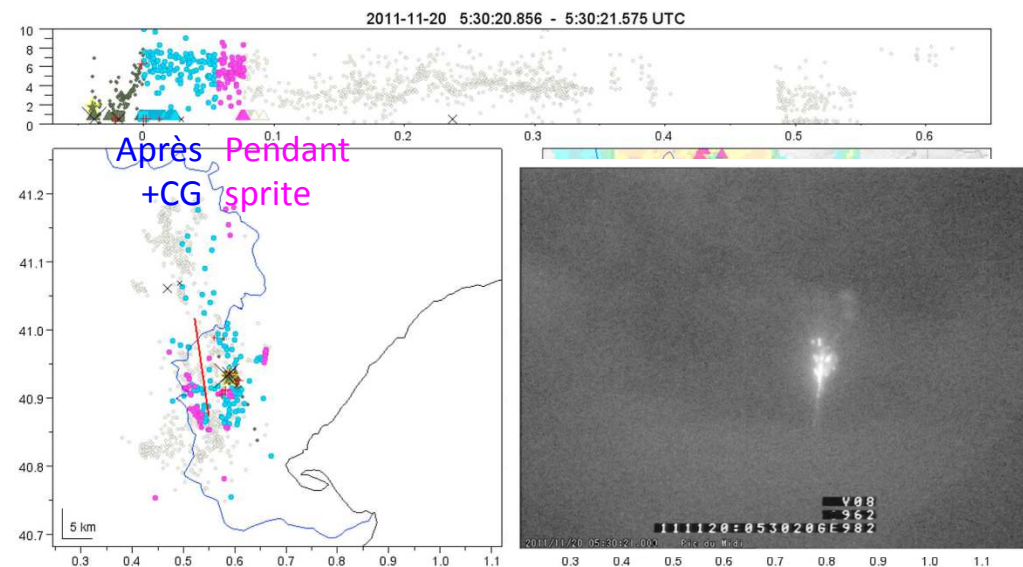
Activité VHF (décharge IC) :

- Faible pour colonne
- Bouffée juste avant l'apparition de la carotte

Ecart temporel éclair parent / TLE :

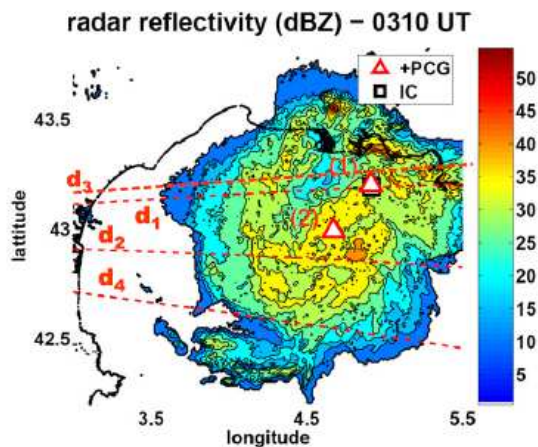
- Halo : < qq millisecondes
- Colonne : < 30 ms
- Carotte : jusqu'à 200 ms
- Fortement retardé : > 10 ms

Ecart spatial avec +CG : en moyenne de 40 km



Sprites : condition d'apparition

Après arc en retour positif (+CG), au dessus de la région stratiforme des systèmes ou des complexes convectifs de moyenne échelle (MCS et MCC)



Activité VHF (décharge IC) :

- Faible pour colonne
- Bouffée juste avant l'apparition de la carotte

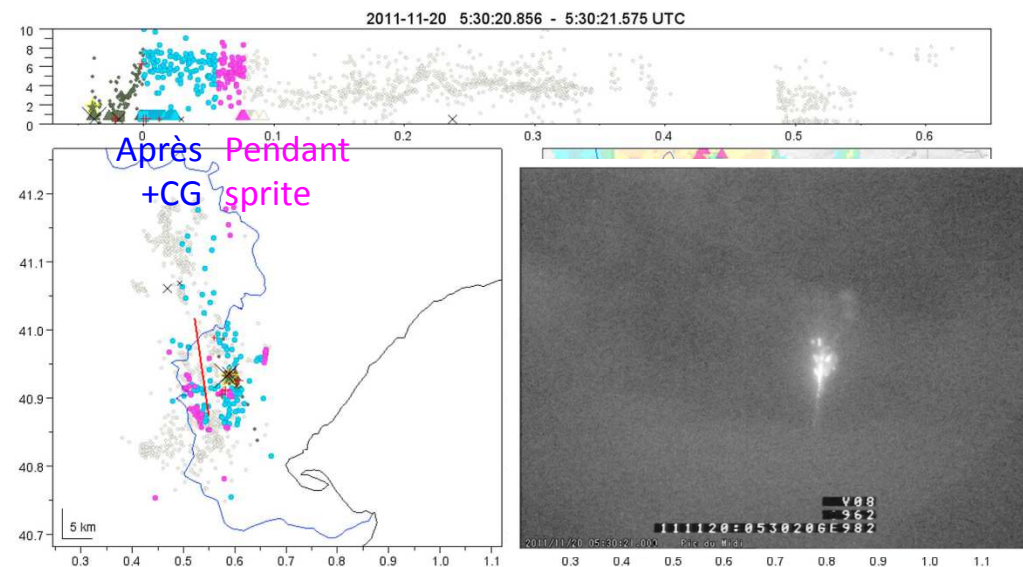
Ecart temporel éclair parent / TLE :

- Halo : < qq millisecondes
- Colonne : < 30 ms
- Carotte : jusqu'à 200 ms
- Fortement retardé : > 10 ms

Ecart spatial avec +CG : en moyenne de 40 km

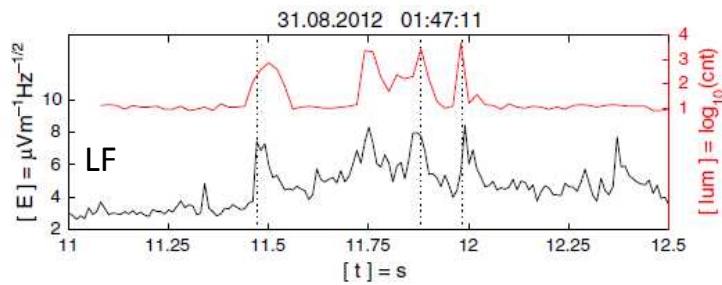
Conditions d'apparition des sprites :

- Variation du moment de charge (CMC) = 500 C km
- durée de la décharge
- mais pas systématique → autres facteurs : pré-ionisation, onde de gravité, météores, ...

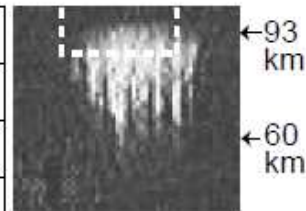
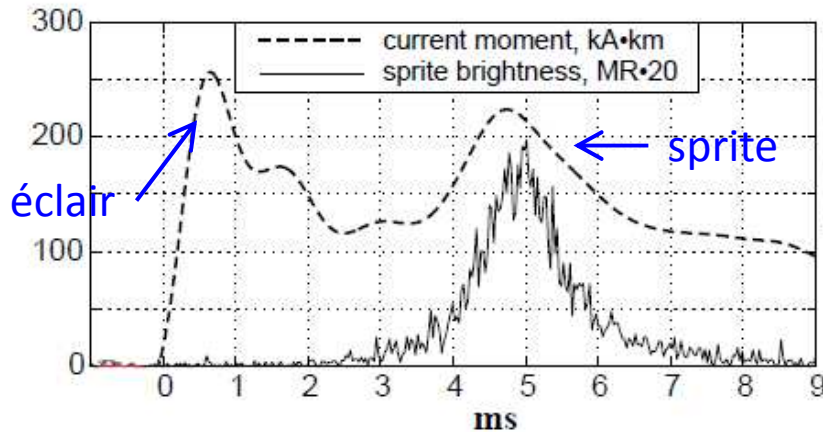
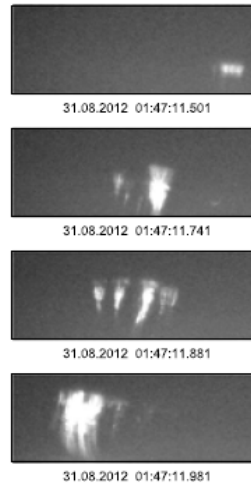


Sprites : émissions radio

Simultanément à l'apparition du sprite, émission de signaux ELF (<3 kHz) et LF (100-300 kHz)



Fullekrug et al., GRL, 2013

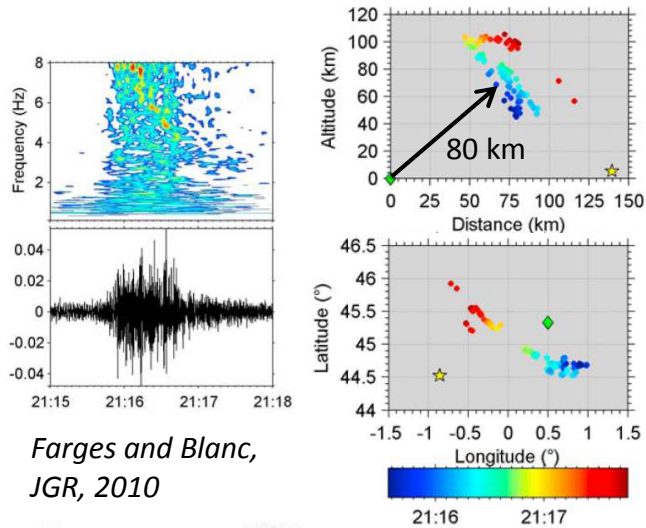


Cummer et al., GRL, 1998

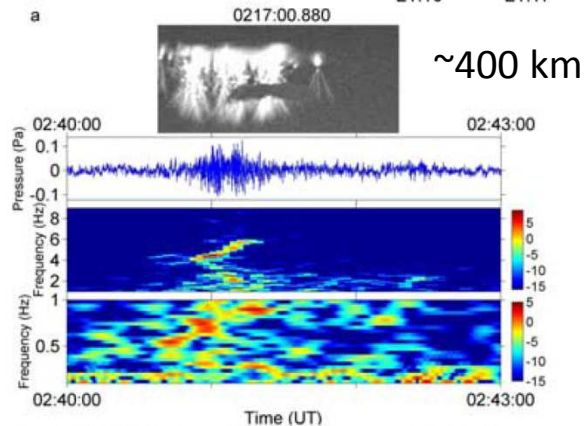
→ Courant circule dans le filament du sprite

Sprites et infrason

Mesures d'infrason (signal acoustique < 20 Hz) corrélées à des observations de sprites pour des distances allant de 100 à 1000 km. En visée directe ($d < 200$ km), la fréquence du signal varie comme un chirp inversé; à plus longue distance on trouve un chirp. La durée du signal est proportionnelle à la taille du sprite dans la direction de propagation.

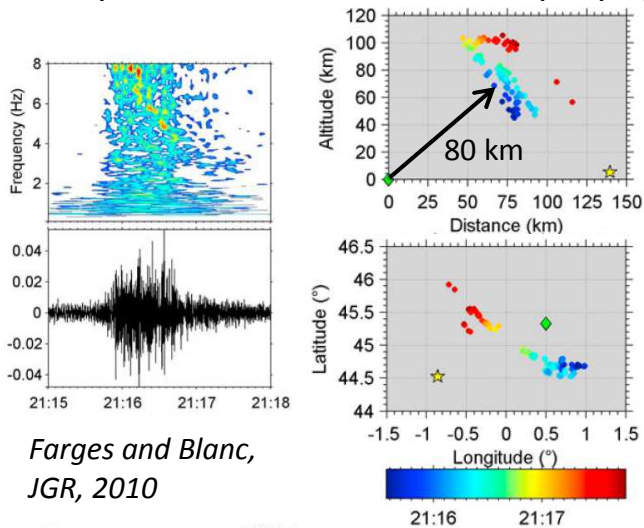


Farges and Blanc, JGR, 2010



Farges et al., GRL, 2005

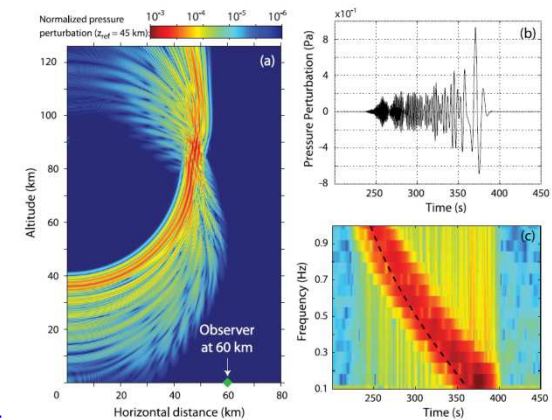
Mesures d'infrason (signal acoustique < 20 Hz) corrélées à des observations de sprites pour des distances allant de 100 à 1000 km. En visée directe ($d < 200$ km), la fréquence du signal varie comme un chirp inversé; à plus longue distance on trouve un chirp. La durée du signal est proportionnelle à la taille du sprite dans la direction de propagation.



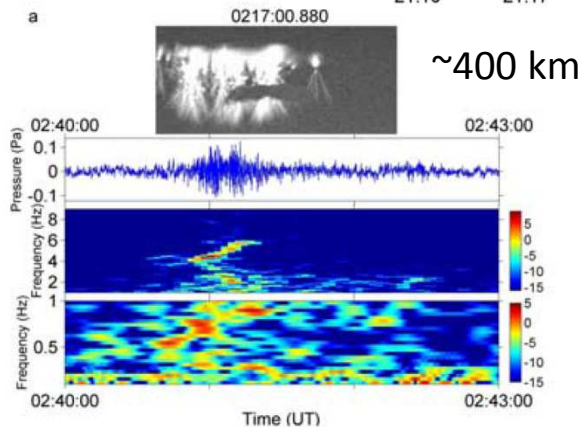
Farges and Blanc, JGR, 2010

Simulations confirment mesures :

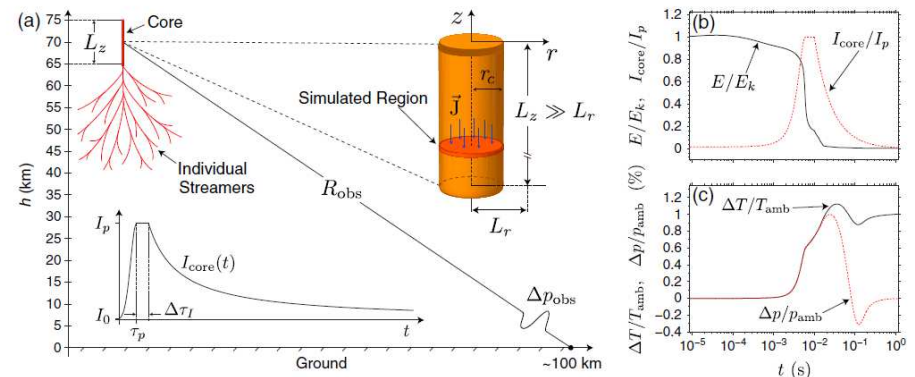
- Forme de chirp inversée s'explique par la dimension des streamers en fonction de l'altitude : les structures plus fines (à basse altitude) rayonnent à plus haute fréquence.
- Le chauffage dans les têtes des streamers entraîne la formation d'une onde acoustique. → seuls les sprites les plus intenses produiraient des infrasons



de Larquier and Pasko, GRL, 2010



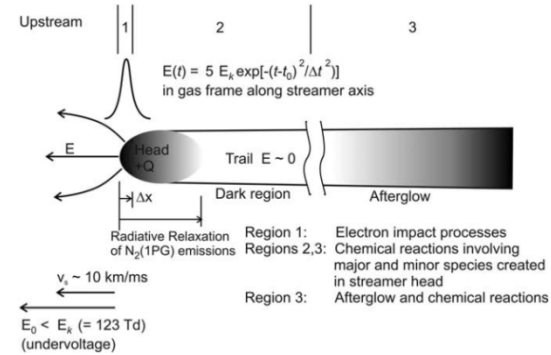
Farges et al., GRL, 2005



da Silva and Pasko, GRL, 2014

Sprites = streamers

Streamer : filaments d'ionisation dans de l'air froid et conduits par de fort champ électrique dû à la séparation de charge présente dans la tête.

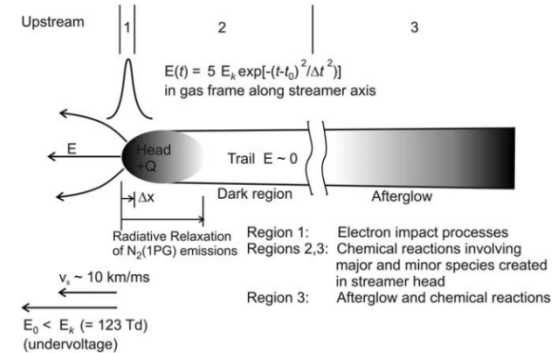


*Sentman et al.,
JGR, 2008*

Sprites = streamers

Streamer : filaments d'ionisation dans de l'air froid et conduits par de fort champ électrique dû à la séparation de charge présente dans la tête.

Etude des streamers de sprite en comparaison de ceux obtenus en laboratoire à pression ambiante avec des lois de similarité (*Liu and Pasko, JGR, 2004; Ebert et al., JGR, 2010*).



*Sentman et al.,
JGR, 2008*

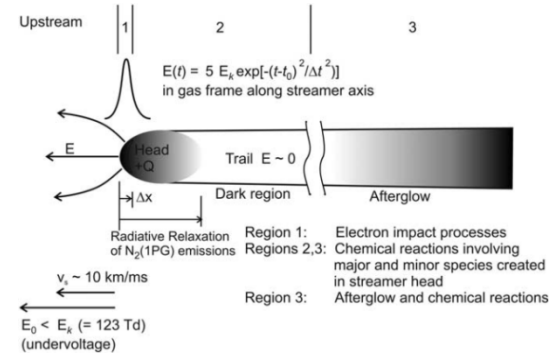
Sprites = streamers

Streamer : filaments d'ionisation dans de l'air froid et conduits par de fort champ électrique dû à la séparation de charge présente dans la tête.

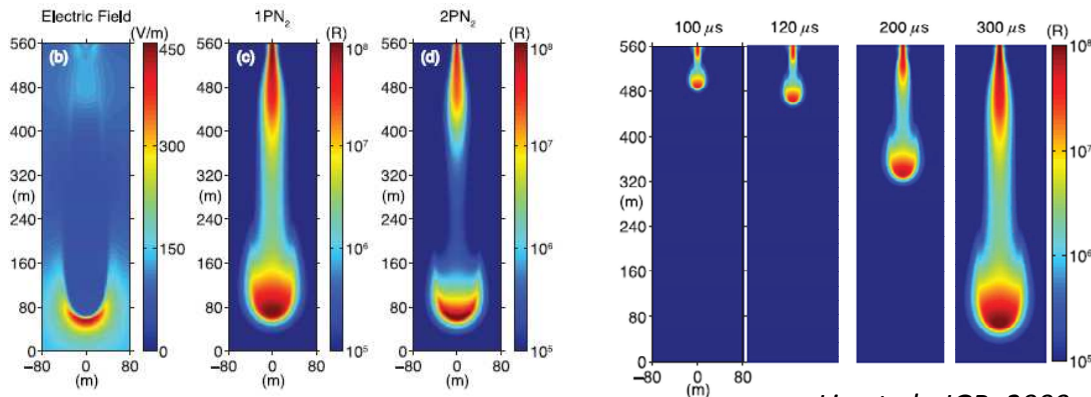
Etude des streamers de sprite en comparaison de ceux obtenus en laboratoire à pression ambiante avec des lois de similarité (*Liu and Pasko, JGR, 2004; Ebert et al., JGR, 2010*).

Les émissions optiques générées dans la tête et dans la queue (« Afterglow ») ont fait l'objet de nombreuses études tenant compte de la densité de l'air (variation d'altitude ou variation locale = « beads ») (*Luque and Ebert, GRL, 2010; Luque and Gordillo-Vázquez, GRL, 2011; Qin and Pasko, GRL, 2015*)

Les streamers se propagent en accélérant et en grandissant pendant la phase initiale du développement. La luminosité croît de 4 ordres de grandeur en 1 ms (*Liu et al., JGR, 2009*).



Sentman et al., JGR, 2008



Liu et al., JGR, 2009

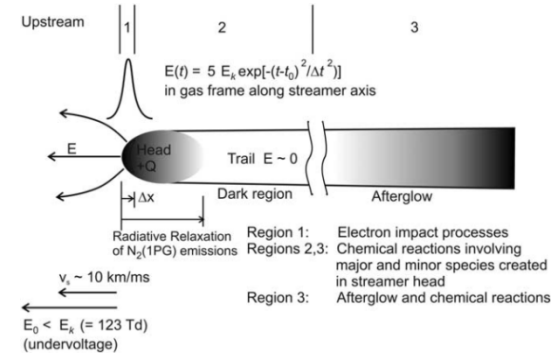
Sprites = streamers

Streamer : filaments d'ionisation dans de l'air froid et conduits par de fort champ électrique dû à la séparation de charge présente dans la tête.

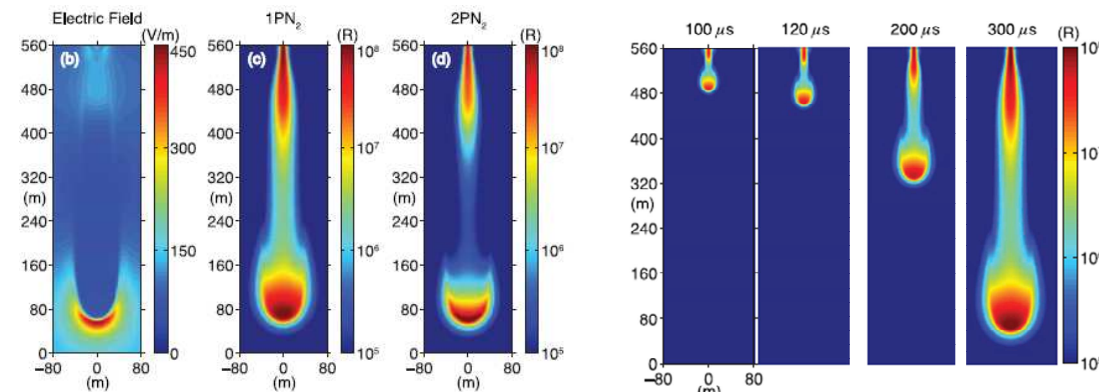
Etude des streamers de sprite en comparaison de ceux obtenus en laboratoire à pression ambiante avec des lois de similarité (Liu and Pasko, JGR, 2004; Ebert et al., JGR, 2010).

Les émissions optiques générées dans la tête et dans la queue (« Afterglow ») ont fait l'objet de nombreuses études tenant compte de la densité de l'air (variation d'altitude ou variation locale = « beads ») (Luque and Ebert, GRL, 2010; Luque and Gordillo-Vázquez, GRL, 2011; Qin and Pasko, GRL, 2015)

Les streamers se propagent en accélérant et en grandissant pendant la phase initiale du développement. La luminosité croît de 4 ordres de grandeur en 1 ms (Liu et al., JGR, 2009).



Sentman et al.,
JGR, 2008



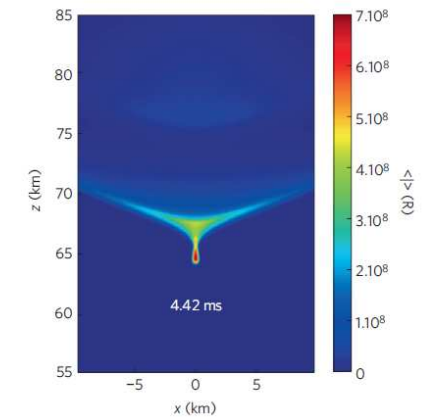
Liu et al., JGR, 2009

Le champ électrique dans la tête peut être déduit du rapport d'intensité entre systèmes de bande (Liu et al., GRL, 2006; Célestin and Pasko, GRL, 2010).

L'augmentation exponentielle du courant dans le streamer induit un champ électrique dont la gamme de fréquence est 0-3 kHz à 75 km d'altitude et jusqu'à 300 kHz à 40 km (Qin et al., GRL, 2012).

Sprites : condition d'initiation

L'initiation des streamers est spontanée, sans l'ajout d'électrode artificielle. Elle est le résultat de l'amincissement et l'effondrement de l'onde d'ionisation associée au halo (*Luque and Ebert, 2009*).

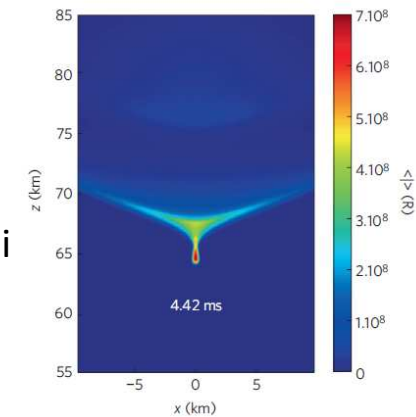


*Luque and Ebert, Nature
Geoscience, 2009*

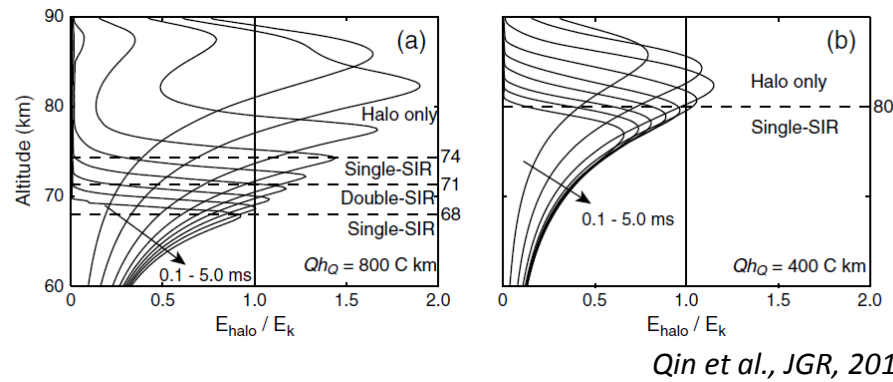
Sprites : condition d'initiation

L'initiation des streamers est spontanée, sans l'ajout d'électrode artificielle. Elle est le résultat de l'amincissement et l'effondrement de l'onde d'ionisation associée au halo (Luque and Ebert, 2009).

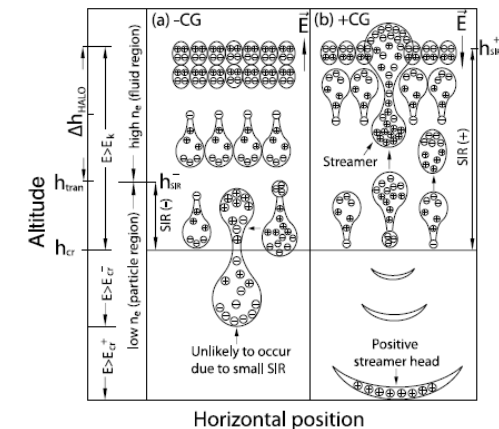
L'origine de l'asymétrie de polarité +CG/-CG dans le déclenchement des streamers semble venir de l'extension verticale de la région d'initiation des streamers (SIR) qui est plus petite pour un -CG (Qin et al., 2011). Les carottes apparaissent pour des CMC importants et durant plus de 2ms alors que les colonnes nécessitent un CMC plus faible (Qin et al., 2013).



Luque and Ebert, *Nature Geoscience*, 2009



Qin et al., *JGR*, 2013



Horizontal position

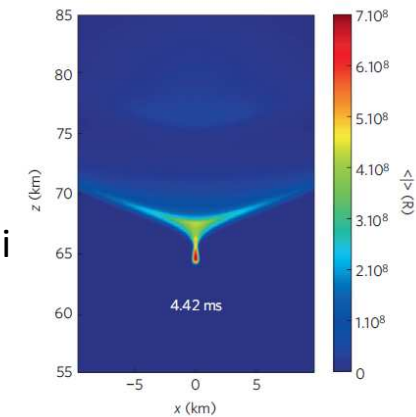
Qin et al., *JGR*, 2011

Sprites : condition d'initiation

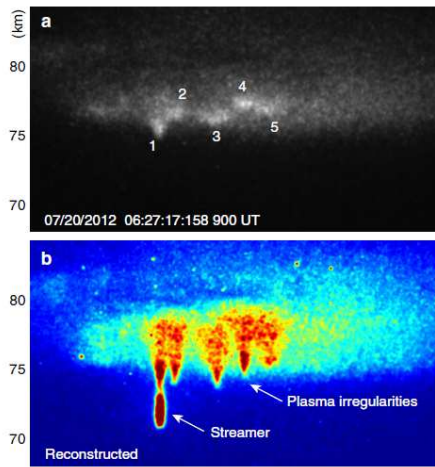
L'initiation des streamers est spontanée, sans l'ajout d'électrode artificielle. Elle est le résultat de l'amincissement et l'effondrement de l'onde d'ionisation associée au halo (Luque and Ebert, 2009).

L'origine de l'asymétrie de polarité +CG/-CG dans le déclenchement des streamers semble venir de l'extension verticale de la région d'initiation des streamers (SIR) qui est plus petite pour un -CG (Qin et al., 2011). Les carottes apparaissent pour des CMC importants et durant plus de 2ms alors que les colonnes nécessitent un CMC plus faible (Qin et al., 2013).

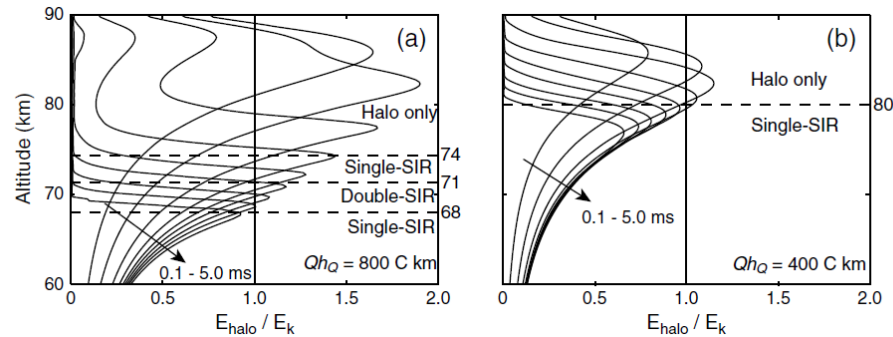
Les inhomogénéités dans la basse ionosphère sont un élément important de l'initiation (Qin et al. 2014).



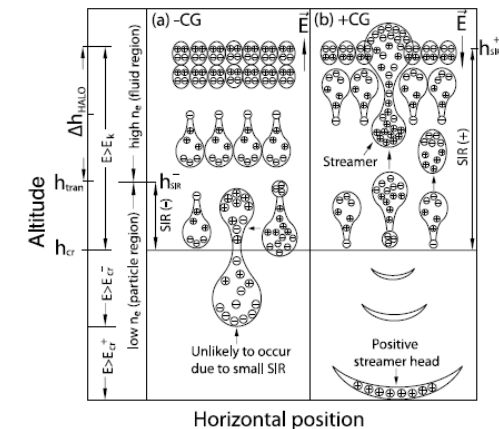
Luque and Ebert, Nature Geoscience, 2009



Qin et al., Nature Comm, 2014



Qin et al., JGR, 2013



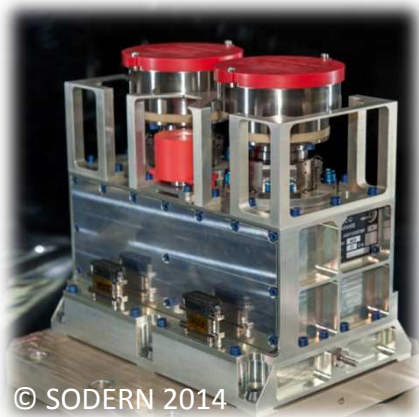
Horizontal position

Qin et al., JGR, 2011

MCP-MC

2 caméras

MCE
éclair
 $777 \pm 5 \text{ nm}$



MCS
éclair + TLE
 $762 \pm 5 \text{ nm}$

Fonctionnement de nuit uniquement

MCP-PH

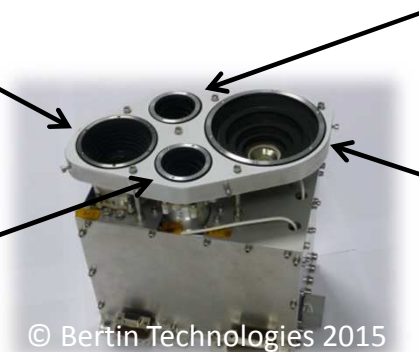
4 photomètres

PH1 (TLE)
 $160-260 \text{ nm}$

PH2 (TLE)
 $337 \pm 5 \text{ nm}$

PH3 (TLE)
 $762 \pm 5 \text{ nm}$

PH4 (éclair)
 $600 - 900 \text{ nm}$



Rayon au sol : 276 km
Cadence image : 10.3 s^{-1}
Dynamique : 12 bits/pixel
Caméras synchrones

Masse: 2.4 kg
Taille: 124 x 179 x 165 mm
Consommation: 11.5 W

Rayon au sol : 276 km,
sauf PH4 700 km
Freq. Échantillonnage: 20 kHz
Dynamique: 12 bits / éch.

Masse: 2.5 kg
Taille: 185 x 127 x 200 mm
Consommation : 5.6 W

Objectifs de MCP :

- Identifier, dater et localiser les TLEs
- Dater et localiser les éclairs
- Informations spectroscopiques (FUV/ UV /NIR) pour les TLE et les éclairs (mécanismes physiques)
- Fournir un signal d'alerte à tous les instruments de TARANIS quand un TLE (ou un éclair fort) est détecté

Merci de votre attention