

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Mesures acoustiques d'éclairs d'orage : localisation 3D

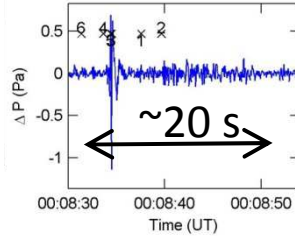
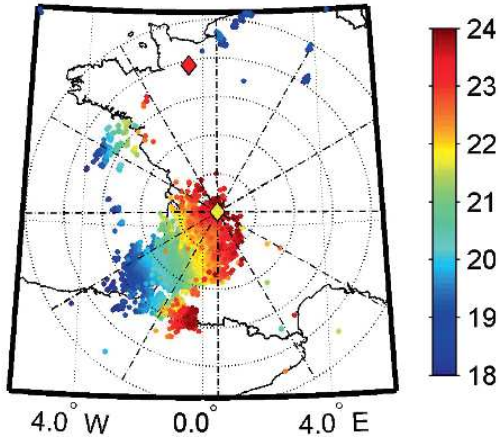
T. Farges (1)

Avec la collaboration de L.-J Gallin (1,2), E. Blanc (1), R. Marchiano (2), F. Coulouvrat (2), E. Defer (3), W. Rison (4), W. Schulz (5), M. Nuret (6)

(1) CEA, DAM, DIF, F – 91297 Arpajon, France, (2) Université Pierre et Marie Curie, France, (3) LERMA , France, (4) NMT, USA, (5) OVE, Austria, (6) Meteo-France, France

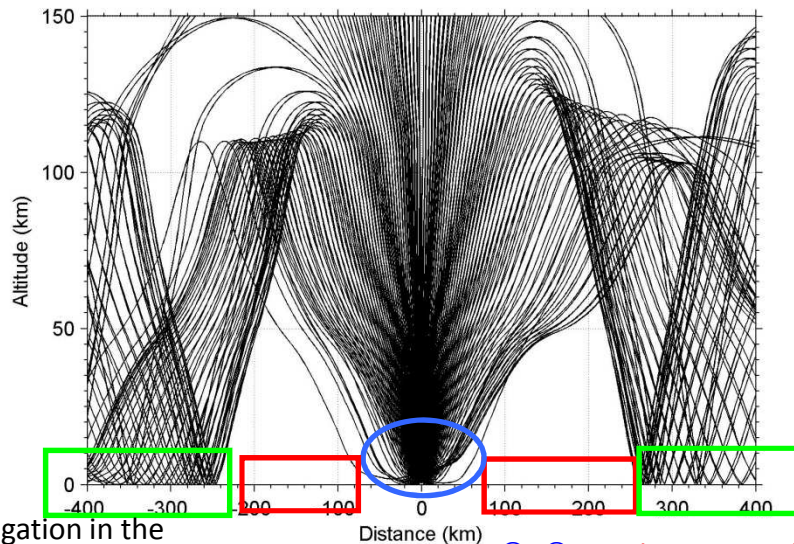
Suivi d'un orage en France en 2005

09/09



1 réseau de 4
μbaromètres
MB2005 : triangle
de 1 km de base

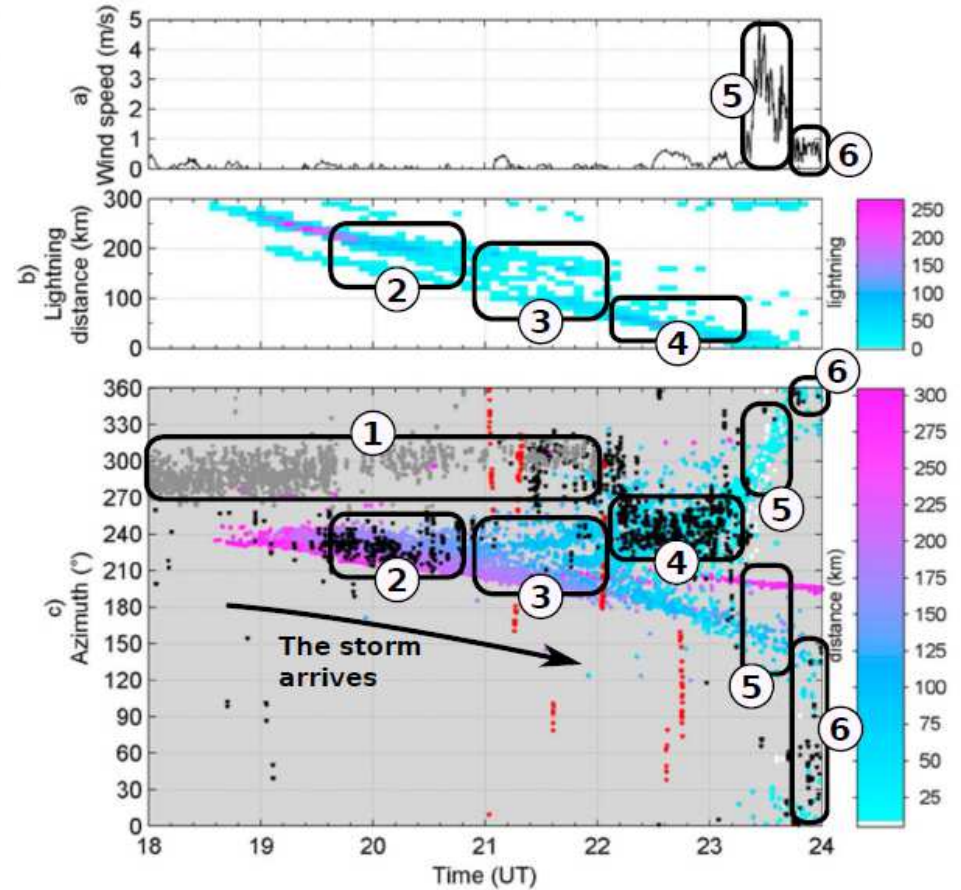
Ray-tracing propagation



Propagation in the
waveguide ②

Direct propagation ④, ⑥ Silence zone ③

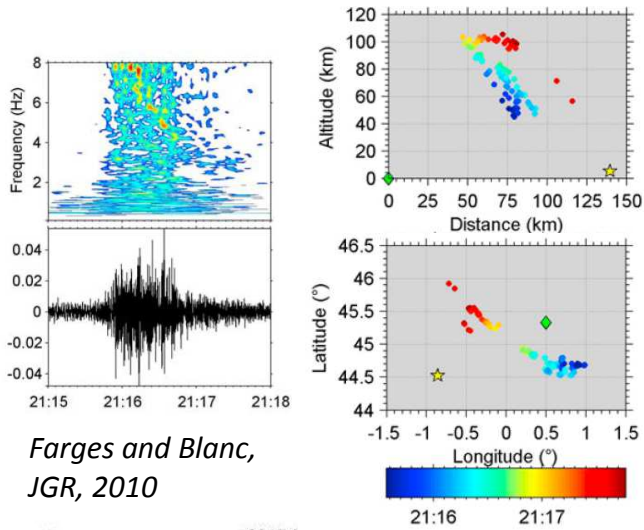
① : houle



Farges and Blanc, 2010

Sprites et infrason

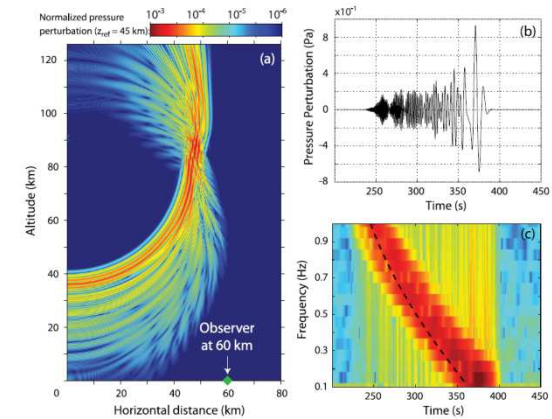
Mesures d'infrason (signal acoustique < 20 Hz) corrélées à des observations de sprites pour des distances allant de 100 à 1000 km. En visée directe ($d < 200$ km), la fréquence du signal varie comme un chirp inversé; à plus longue distance on trouve un chirp. La durée du signal est proportionnelle à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



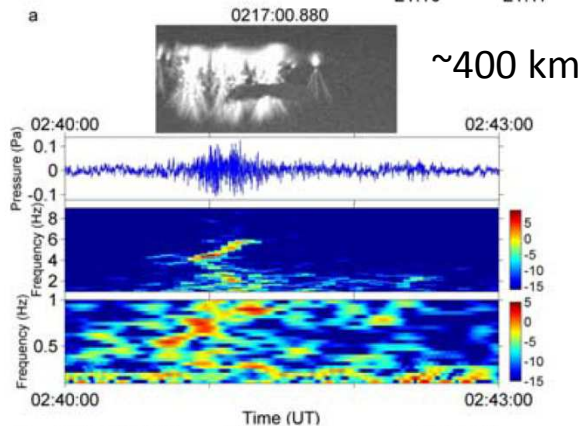
Farges and Blanc, JGR, 2010

Simulations confirment mesures :

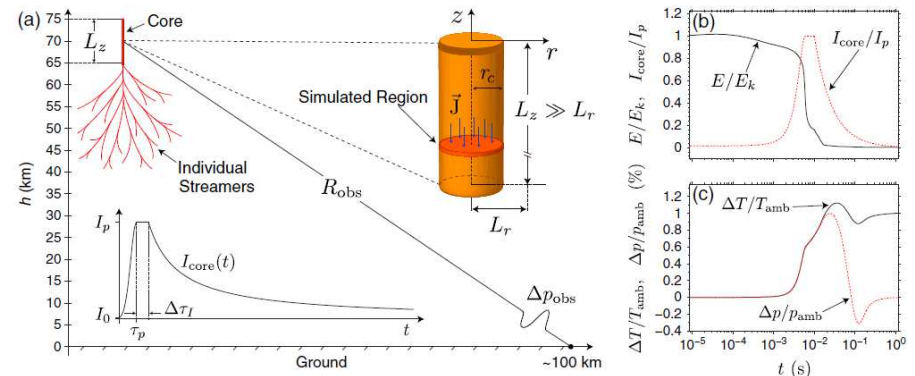
- Forme de chirp inversée s'explique par la dimension des streamers en fonction de l'altitude : les structures plus fines (à basse altitude) rayonnent à plus haute fréquence.
- Le chauffage dans les têtes des streamers entraîne la formation d'une onde acoustique. → seuls les sprites les plus intenses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



de Larquier and Pasko, GRL, 2010



Farges et al., GRL, 2005



da Silva and Pasko, GRL, 2014

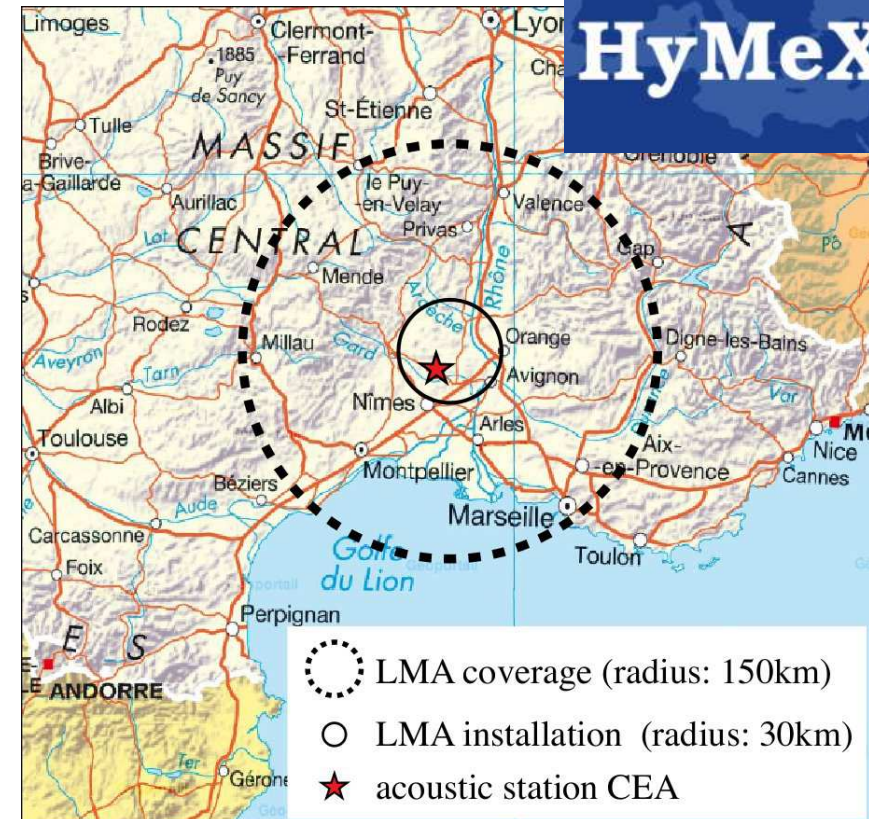
Campagne SOP1 du programme HyMeX Instrumentation pour l'étude des éclairs

Observations dans le Sud de la France (Cévennes-Vivarais)
Septembre - Novembre 2012



TTO1h (PEACH) = équipe éclair → étude de la relation entre crue soudaine et activité électrique [Defer et al., 2015] :

- **Structures 3D des décharges (LMA)**
- **Systèmes opérationnels de localisation des coups de foudre (ATDnet, EUCLID, LINET, ZEUS).**
- **Station acoustique du CEA** (au centre de la zone de couverture du LMA)
- **Simulations météo par AROME-WMED + ré-analyses** pour la SOP1
- Autres instruments non utilisés ici (caméras, ...)



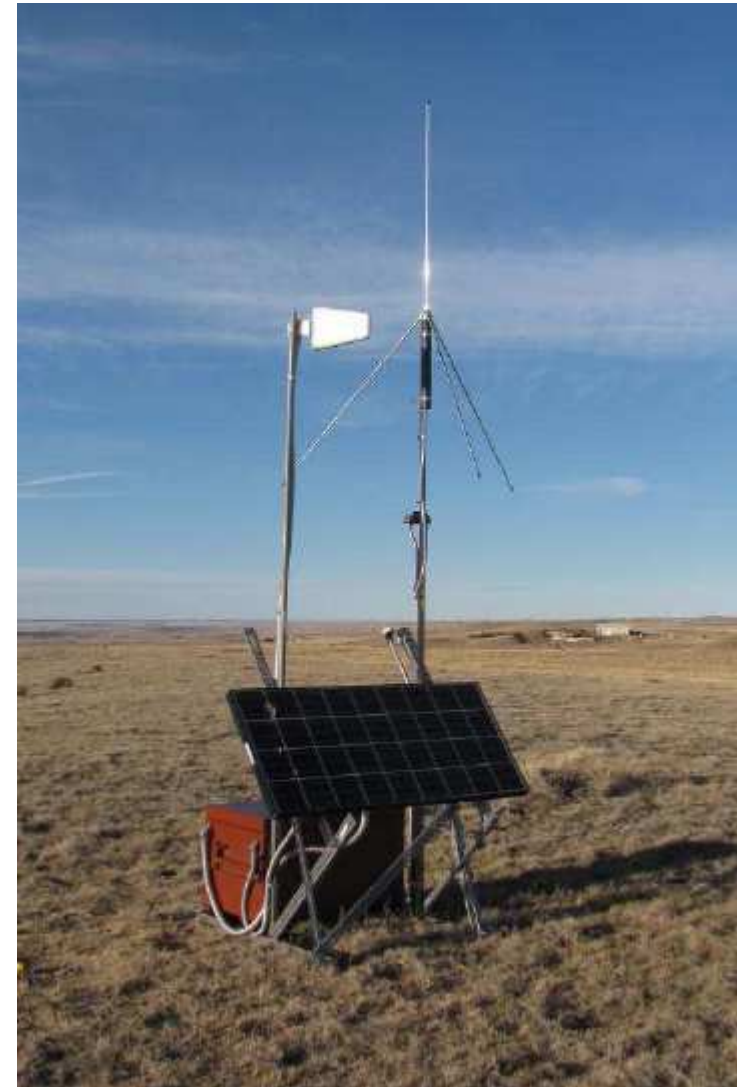
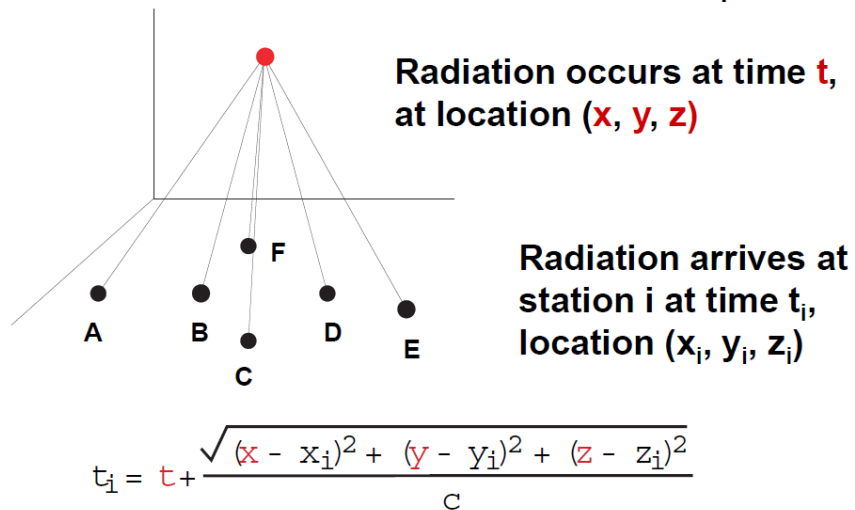
➔ Plusieurs orages favorables, moins de 75 km de la station CEA : 24/09, 25/09, **26/10**

Lightning Mapping Array (NMT)

- Electromagnétisme, Très Haute Fréquence (60 MHz)
- Structure détaillée des décharges orageuses.
- Résolution temporelle : 8 ns.
- Résolution spatiale : 200 m.

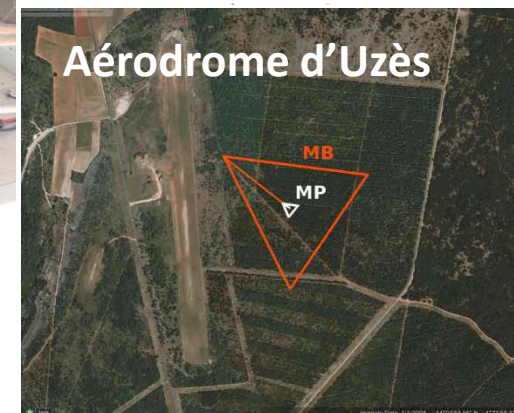
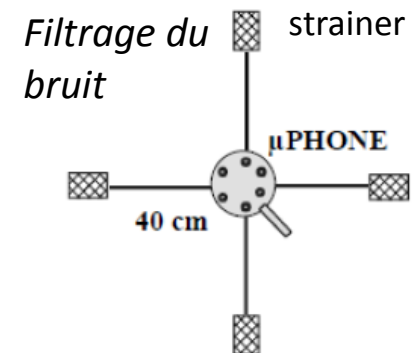
Time of Arrival Lightning Mapping System

- Measure time RF pulse arrives at multiple stations
- Determine position and time of source
- Locate hundreds to thousands of sources per flash



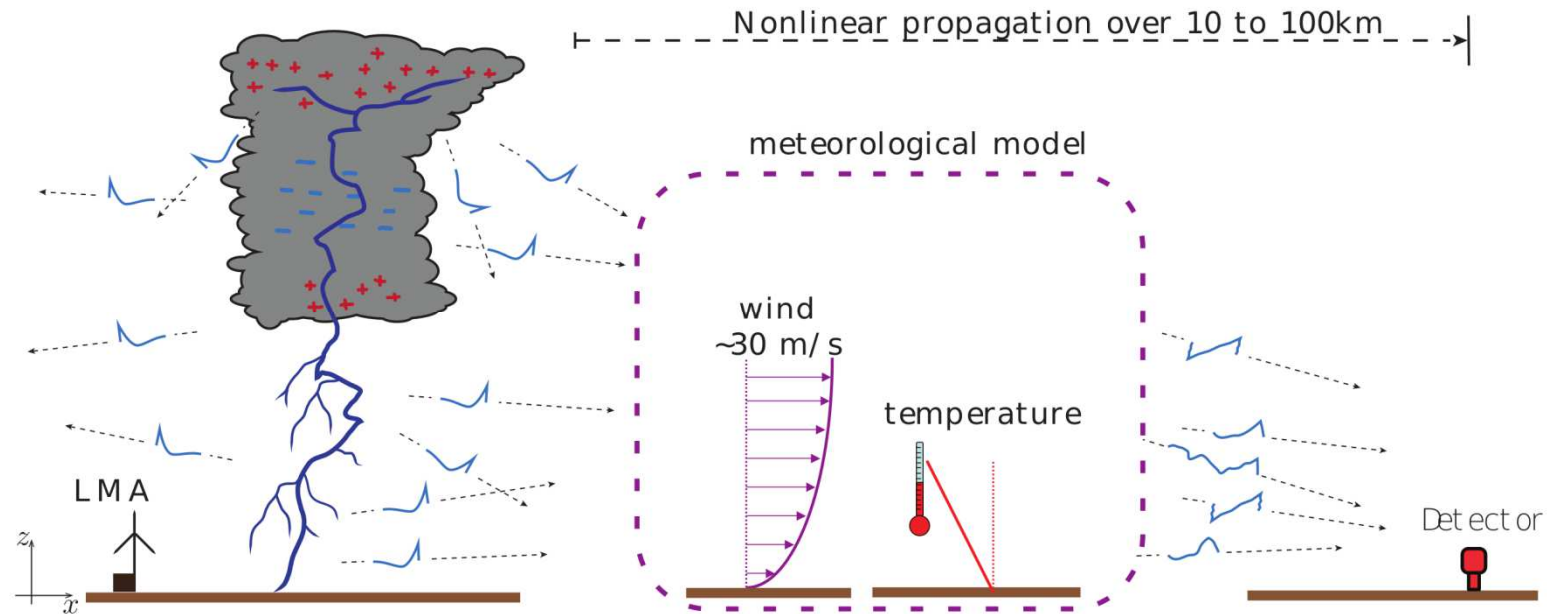
Station acoustique (CEA)

- **4 μ baromètres** (10^{-5} – 30 Hz, $f_{ech} = 50$ Hz) : triangle de 500 m coté
- **4 μ phones** (0.1 Hz – 20 kHz, $f_{ech} = 500$ Hz) : triangle de 50 m coté co-localisé avec μ baromètre central
- Pas de données temps réel, datation GPS
- Données disponibles sur le site de HyMeX (<http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX/>)



Objectifs de l'étude

Mécanisme à l'origine des infrasons liés au tonnerre toujours en discussion.



- Relation entre le signal acoustique et la géométrie des décharges orageuses :
 - Reconstruction de la structure 3D à partir de mesures acoustiques (études de cas)
 - Etudes statistiques sur un jeu de 56 éclairs reconstruits avec des mesures acoustiques et comparaison avec les mesures LMA.
- Impact des profils météo sur les formes d'onde de tonnerre. Code de simulation a été développé FHoward2D [Gallin et al., JASA,2014]. Quelques résultats pour l'interprétation des éclairs mais problème pleinement 3D.

Reconstruction des décharges orageuses à partir de mesures acoustiques

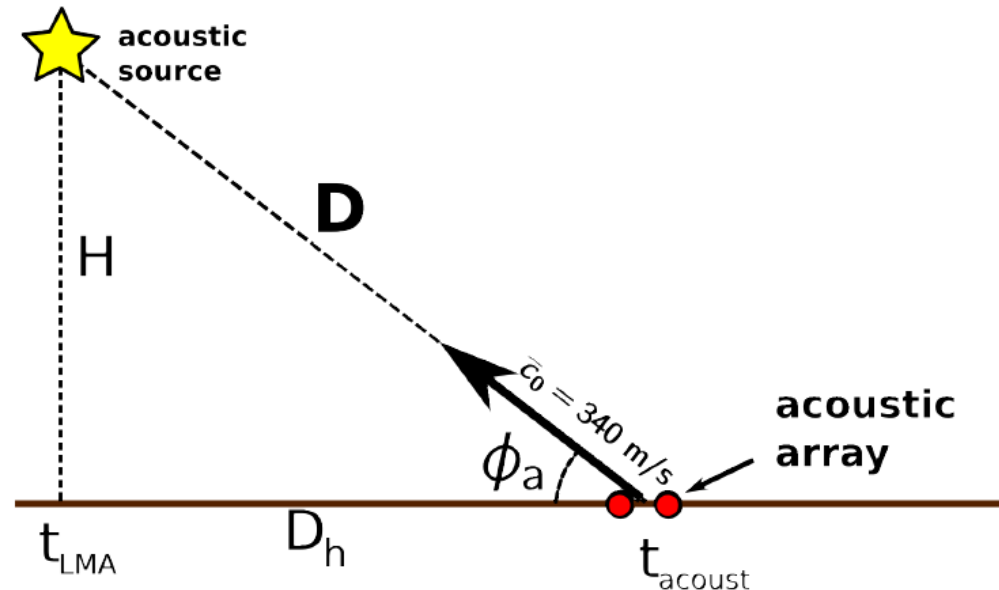
Traitement PMCC sur données acquises par les 4 capteurs [Cansi, 1995]:

- Temps de l'événement détecté,
 - Azimut,
 - Vitesse horizontale, V_h ,
 - Amplitude RMS
- par bande de fréquence (0 – 40 Hz)

L'angle d'élévation ϕ_a est calculé :

$$\cos(\phi_a) = \frac{c_0}{V_h}$$

où c_0 est la vitesse du son au sol.

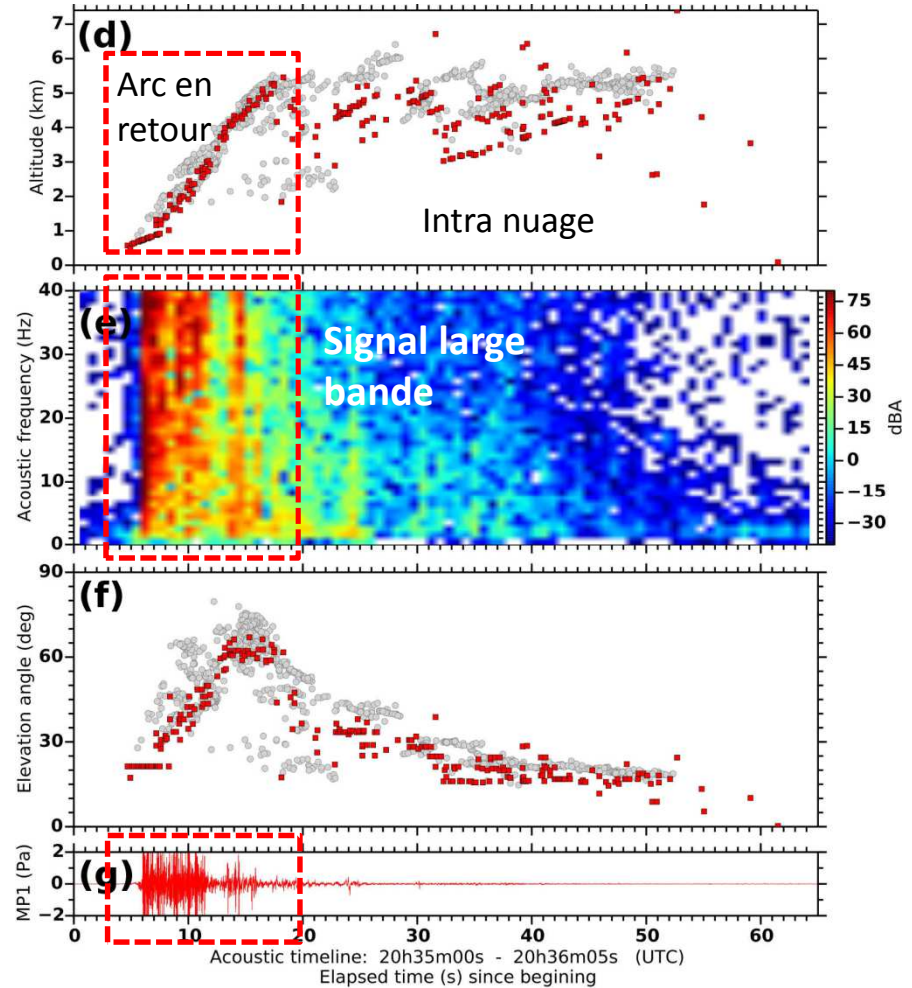
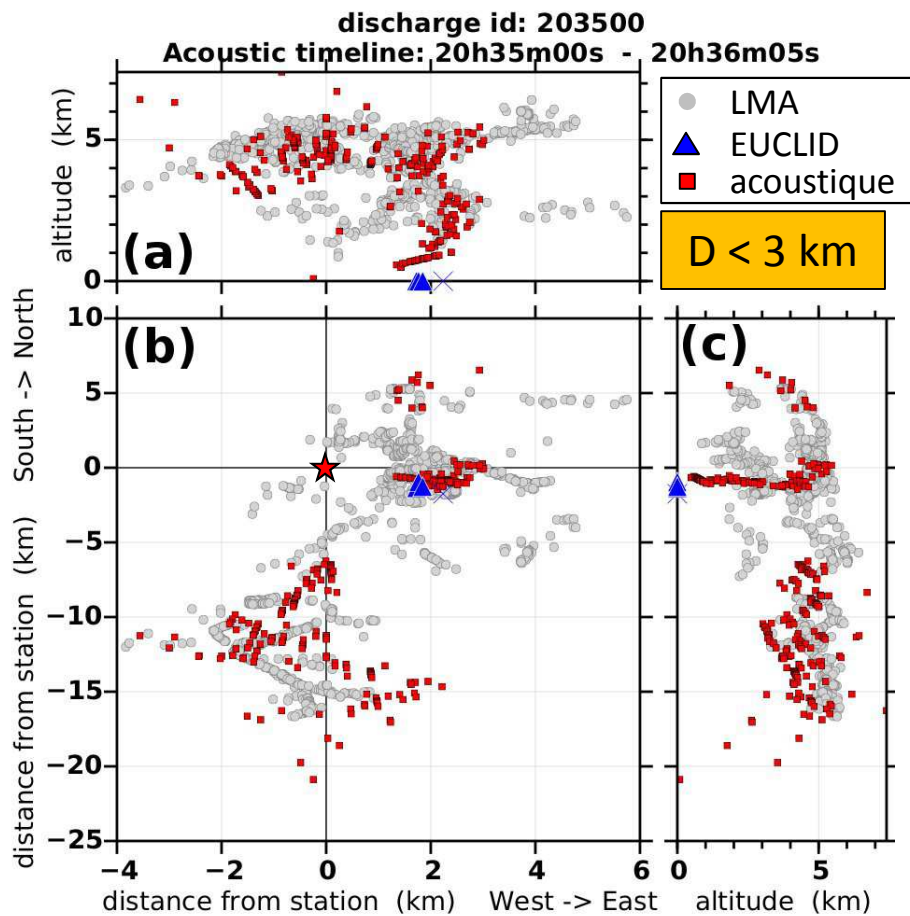


Méthode de reconstruction :

1. Le temps de propagation est déduit de la différence de temps entre celui de la décharge (LMA ou EUCLID) et le temps d'arrivée acoustique (donné par PMCC)
2. Propagation en ligne droite depuis le centre du réseau vers la source à la vitesse du son au sol (hypothèse très forte) en utilisant l'azimut, l'angle d'élévation et le temps de propagation.

Résultats: caractérisation d'un arc en retour proche

Les sources acoustiques reconstruites coïncident très bien avec les mesures LMA

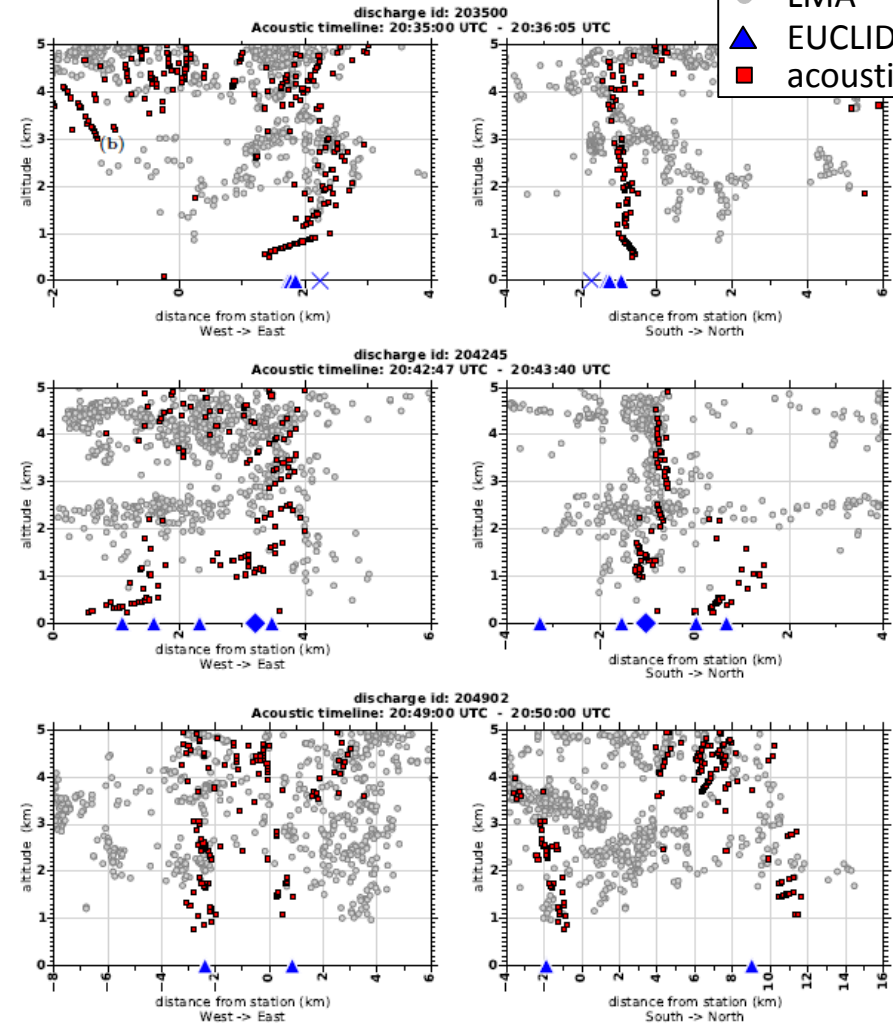
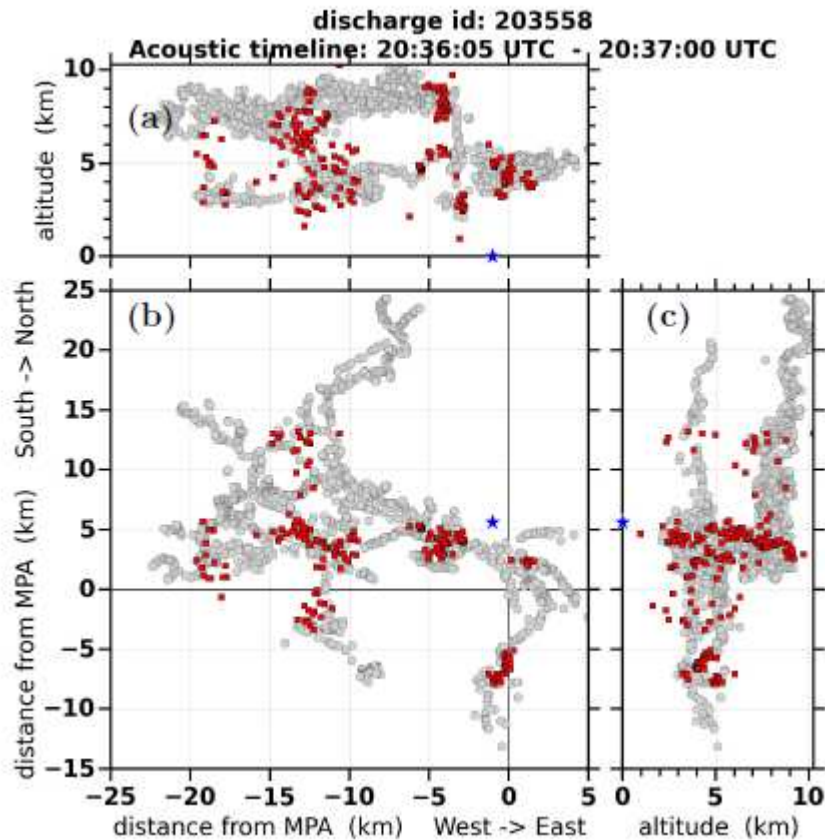
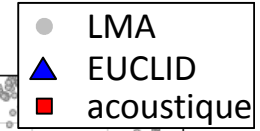


Gallin, thèse, 2014

Gallin et al., JGR, submitted

Résultats: caractérisation d'un arc en retour proche

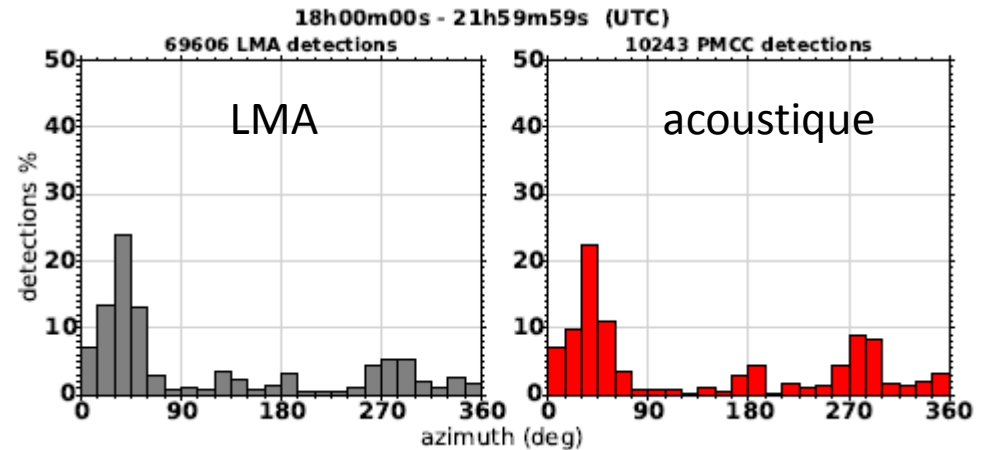
Cas d'un intra-nuage (IC+)



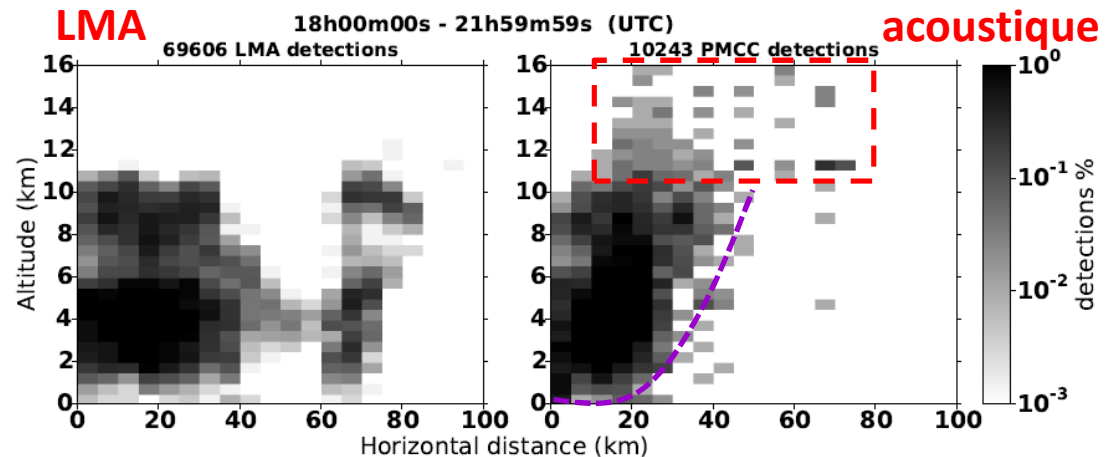
◆: -IC; ▲: -CG; ×: +CG

Résultats: statistiques

- Distribution azimutale : décharges détectées dans toutes les directions avec même proportion pour LMA et acoustique.



- Distribution altitude/distance :
 - Bonne jusqu'à 20 km de la station
 - Biais en altitude pour éclairs distants > 20 km: quelques sources trop hautes
 - Apparition de la zone d'ombre (20-40 km)



Observations :

- Bonne correspondance entre décharges LMA et sources acoustiques reconstruites
→ **lien clair entre la géométrie de l'éclair et le signal acoustique**
- Contenu acoustique large bande. Les arcs en retour émettent un signal infrasonore important
→ **implication pour le mécanisme source du tonnerre dans la gamme infrasonore**

Statistiques :

- **Première étude avec autant d'éclairs naturels reconstruit acoustiquement.**
 - Reconstruction acoustique 3D possible si éclair < 25 km. Biais en altitude au-delà.
 - Complémentarité avec LMA pour les basses altitudes.
 - Détection acoustique jusqu'à 75 km (confirmation de Farges et Blanc [2010])

Perspectives :

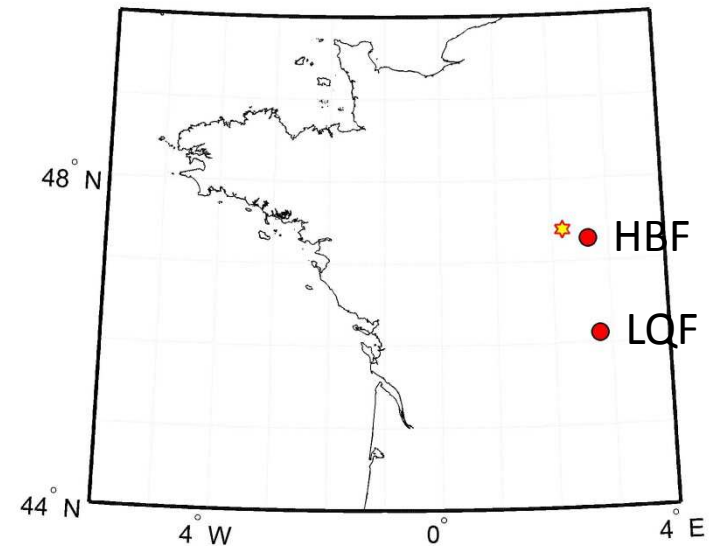
- Poursuivre l'analyse : impact de la météo sur les formes d'onde de tonnerre (simulation 3D), regarder d'autres orages de la SOP1 (24/09, 25/09 ...), et caractériser les éclairs (en particulier éclairs intra-nuage) avec les mesures acoustiques → nouvelle thèse débute en novembre 2015
- Approfondir la possibilité d'utiliser les petits réseaux acoustiques (4 μ phones, 50 m de coté ou moins) pour décrire l'activité orageuse en particulier intra-nuage quand un LMA n'est pas disponible.

CEA dispose d'antennes électriques large bande (1 kHz – 10 MHz) situées entre 40 et 150 km de Nançay [*Farges and Blanc, 2011*].

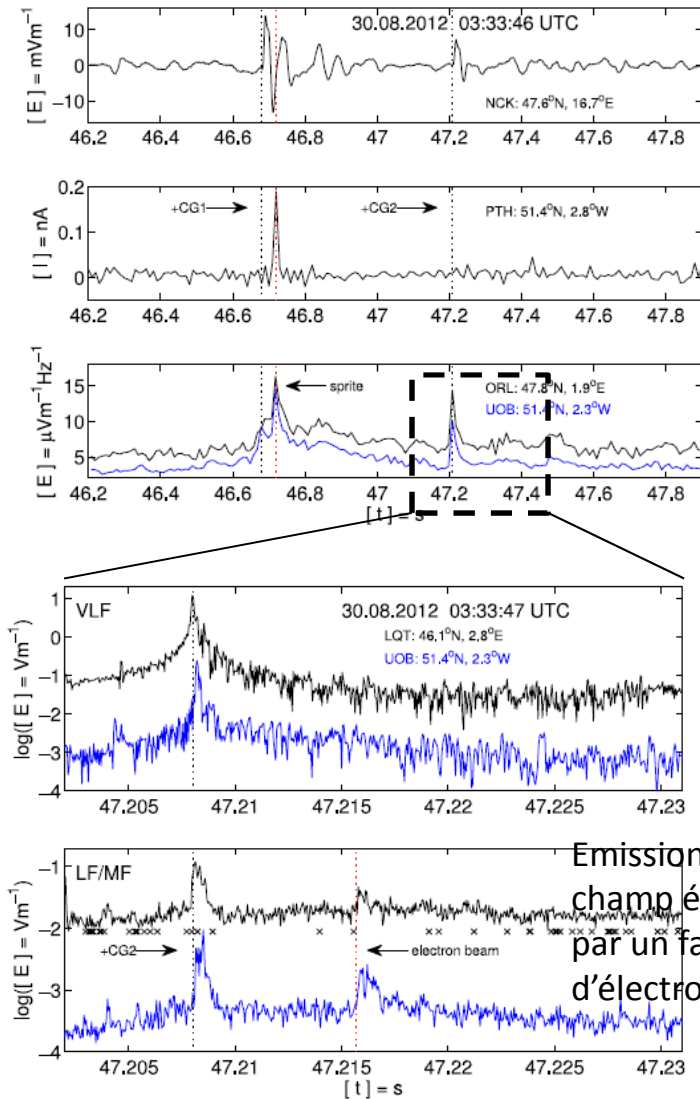
Mesure par dépassement de seuil (30 ms avec 6 ms en pre-trigg), datée GPS

Utilisées dans différentes études sur :

- Signal ELF lors de sprite énorme (« méduse ») [*Soula et al., 2014*]
- Propagation du signal du Preliminary Breakdown sur plusieurs centaines de km [*Kolmašová et al., 2014*]
- Signal MF émis par un faisceau d'électrons relativistes [*Füllekrug et al., 2013*]
- Occurrence d'un jet géant en Méditerranée [*van der Velde et al., 2010*]
- Blackout radio MF provoqué par les elves [*Farges et al., 2007*]

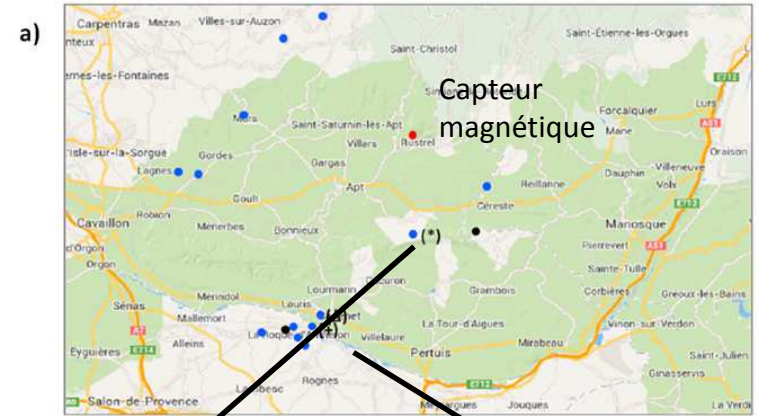


Quelques exemples

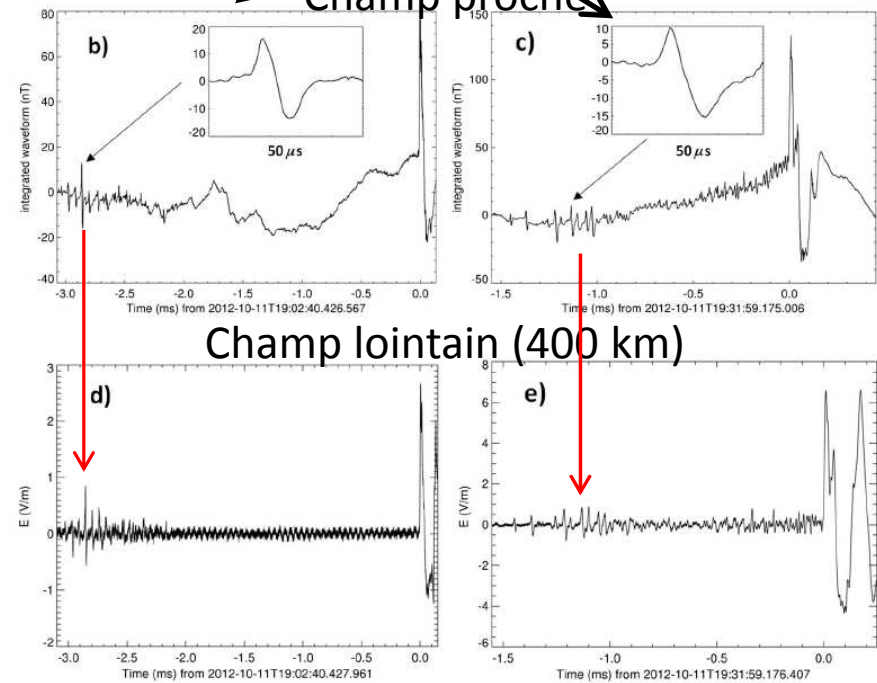


Emission d'un champ électrique par un faisceau d'électrons

Füllekrug et al., 2013



Champ proche



Champ lointain (400 km)

Kolmašová et al., 2014