



Caractérisation des éclairs d'orage par mesure acoustique

L.-J. Gallin^a, F. Coulouvrat^b, R. Marchiano^b et T. Farges^a

^aCEA, CEA / DAM Ile De France, Bruyères-le-Châtel, 91297 Arpajon Cedex, France

^bInstitut Jean le Rond d'Alembert-UPMC, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

gallin@dalembert.upmc.fr

L'objectif est d'étudier la transformation du tonnerre (amplitude, spectres) pendant sa propagation depuis le canal d'éclair jusqu'à un détecteur (microphone, microbaromètre) en se basant sur deux approches complémentaires. Dans un premier temps, l'analyse des enregistrements acoustiques (audibles et infrasons) obtenus durant la campagne HyMeX-SOP1 (Automne 2012) nous fournit des cartes 3D des sources infrasonores présentes dans l'arc en retour et dans la décharge horizontale à l'intérieur du nuage. Nous montrons qu'elles sont parfaitement corrélées aux résultats fournis par des outils électromagnétiques très précis. Des spectres de tonnerre ont pu être associés aux différentes phases de la décharge. Il apparaît que la propagation de l'onde acoustique perturbe la localisation pour les distances supérieures à 20km. Dans un second temps le code de calcul Flhoward construit pour simuler la propagation non linéaire des ondes de choc acoustiques à travers un modèle de météo réaliste (comprenant des gradients de température, un sol rigide, et un modèle de vent) permet d'étudier les formes d'ondes au cours de leur propagation. La simulation numérique avec Flhoward aide à comprendre l'impact des profils météorologiques sur la propagation des signatures acoustiques.

1 Introduction

La vérification du Traité d'Interdiction Complet des Essais Nucléaires (TICE) a conduit à la mise en place d'un réseau international de détection des explosions. La surveillance dans la gamme infrasonore (jusqu'à une fréquence de 20Hz) des ondes acoustiques qui se propagent dans l'atmosphère est une des technologies utilisées. Ceci est réalisé par un réseau de 60 stations déployées uniformément sur la surface de la terre. Campus et Christie [3] passent en revue les sources humaines ou naturelles qui produisent des infrasons. Quelques unes d'entre elles sont rappelées dans le tableau 1. Les ondes de choc acoustiques émises par les éclairs sont les plus fréquentes sources naturelles de type impulsionnel. Leur contenu acoustique est à large bande, la partie de 1Hz à 20Hz crée un bruit de fond élevé pour les stations de surveillance localisées dans les régions où l'activité orageuse est la plus intense. Elle peut ainsi donner lieu à de fausses alarmes.

Les travaux pionniers sur la détection acoustique des éclairs d'orage remontent aux années 1970–1980 avec les premières explorations acoustiques des décharges de foudre. Few est le premier à avoir étudié la reconstruction acoustique des décharges de foudre à partir d'enregistrements de tonnerre [8]. Ces reconstructions ont permis les premières observations des mécanismes de décharges de foudre à l'intérieur des nuages [12]. Du fait des implications

TABLEAU 1 – Exemple de quelques sources humaines ou naturelles produisant des infrasons. Tableau extrait de Campus et Chirstie [3].

Source	Fréquences (Hz)	Amplitudes observées (maxima) (Pa)	Distance de détection (km)
Explosion nucléaire aérienne	0.002–20	>20	>20 000
Météorite	0.01–20	>10	>20 000
Avion	0.3–20	~2	<100
Décharge de foudre	0.5–20	~2	~50

pour le TICE et de l'actuelle excellente maîtrise des réseaux acoustiques, les études sur le tonnerre connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt. Assink *et al.* [2] proposent une étude des infrasons émis lors d'un orage aux Pays-Bas. Arechiga *et al.* [1] travaillent sur la reconstruction acoustique d'éclairs déclenchés artificiellement, leurs travaux montrent de bons résultats pour les parties des décharges à l'intérieur des nuages. Farges et Blanc [7] explorent les infrasons émis par les décharges.

Nous explorons les données d'éclairs et de tonnerre obtenues lors d'une campagne d'observations dans le cadre d'un projet européen. Nous montrons que les enregistrements acoustiques permettent de reconstruire la géométrie des décharges proches de la station de mesure. Pour des décharges plus lointaines, la simulation numérique aide à interpréter les biais observés dans les reconstructions.

2 La campagne de mesure acoustique et électromagnétique des éclairs réalisée dans le Sud-Est de la France durant l'Automne 2012

Une campagne d'observations des précipitations intenses et des épisodes orageux nommée HyMeX-SOP1, s'est déroulée du 6 Septembre 2012 au 6 Novembre 2012 dans le Sud-Est de la France [6]. Elle s'est inscrite dans le projet européen HyMeX [5] qui a pour but de mieux comprendre le cycle de l'eau dans le bassin méditerranéen. Au cours de la campagne d'observations HyMeX-SOP1, un dispositif expérimental d'observation des éclairs a été déployé.

Il comprenait un réseau de recherche de détection des éclairs [11] (Lightning Mapping Array, acronyme : LMA) déployé pour la première fois en Europe. Le LMA est un réseau de recherche de petite taille pour la localisation électromagnétique à haute résolution spatiale et temporelle des décharges de foudre. Il est constitué d'un ensemble d'antennes capables de localiser avec une grande précision spatiale et temporelle, les sources électromagnétiques très haute fréquence (dans la bande 60MHz–66MHz) produites par les décharges de foudre à l'intérieur des nuages. Cet instrument est développé par le New Mexico Tech. Douze antennes ont été déployées lors de la campagne HyMeX-SOP1.

Le CEA a installé deux réseaux de mesure acoustique dans le Sud-Est de la France près de la ville d'Uzès, à l'intérieur de la zone de couverture du LMA (voir figure 1). Ces réseaux ont fonctionné du 27 Août 2012 au 20

Novembre 2012. La station acoustique était composée d'un premier réseau de 4 microbaromètres placés aux sommet d'un triangle équilatéral de 500m de côté, le quatrième capteur étant placé au barycentre du réseau. La gamme de fréquences accessibles est de 10^{-5} Hz à 30Hz. Les données issues des microbaromètres étaient échantillonnées à 50Hz. Un filtre passe-haut atténue fortement les fréquences inférieures à 10^{-3} Hz. Un second réseau de 4 microphones organisés en un triangle équilatéral de 50m de côté et de même orientation que le premier réseau, a été déployé. Le capteur central était co-localisé avec le microbaromètre du centre. Les microphones étaient échantillonnés à 500Hz.

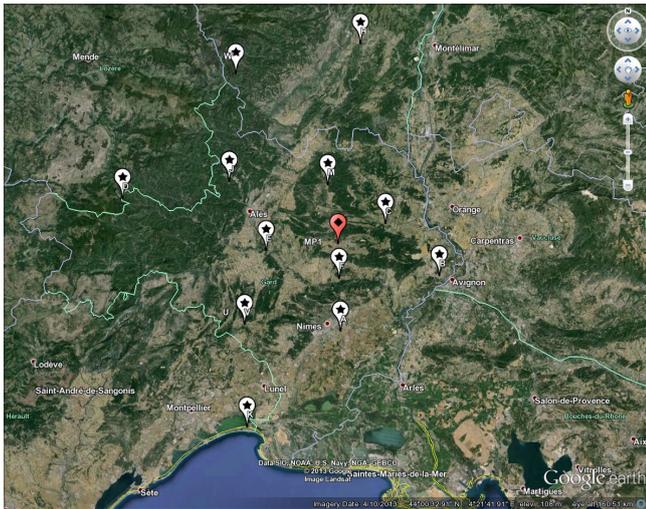


FIGURE 1 – Positions des antennes du réseau LMA (étoiles sur fond blanc). Losange sur fond rouge : position de la station acoustique du CEA.

Dans le cadre du projet HyMeX, le réseau opérationnel EUCLID (acronyme de "EUropean Cooperation for LIghtning Detection") de localisation électromagnétique des éclairs met à disposition de la communauté les bulletins des éclairs détectés ayant établis une connexion entre le nuage d'orage et le sol (le canal ionisé établi est couramment appelé "arc-en-retour"), ainsi que les éclairs produits à l'intérieur des nuage sans connexion avec le sol. Le suivi en temps réel des détections peut-être visualisé sur le site d'EUCLID, <http://www.euclid.org/realtime.html>. Météo-France met aussi à disposition de la communauté les réanalyses du code de calcul opérationnel AROME-WMED [13]. Les calculs ont été réalisés sur une région englobant le bassin méditerranéen. Des profils de vent et de température sont disponibles, notamment autour de la station acoustique près d'Uzès. La résolution est de 2.5km en longitude et latitude, et les profils verticaux sont calculés jusqu'à une altitude de 16km. La base de données HyMeX est accessible à l'adresse <http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX/>, une inscription est nécessaire.

3 Exploration de l'évènement du 26 Octobre 2012

3.1 Méthode de reconstruction acoustique des éclairs d'orage

L'étude des données EUCLID montre qu'une cellule orageuse est passée juste au-dessus de la station acoustique

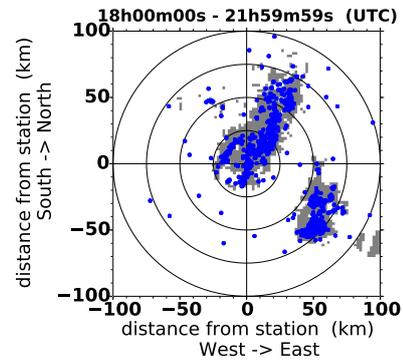


FIGURE 2 – Activité orageuse le 26 Octobre 2012 pour la période de 18h00 UTC à 22h00 UTC autour de la station acoustique. La station acoustique du CEA est placée à la coordonnée (0,0). Points bleu : détections EUCLID. Régions grisées : carrés de 2km par 2km où il y a plus de 20 détections LMA.

le 26 Octobre 2012 de 18h UTC à 22h UTC. Cet orage n'est pas trop actif et l'on peut différencier clairement les éclairs les uns des autres. Les enregistrements LMA et acoustiques sont d'excellente qualité. La figure 2 présente l'ensemble de l'activité orageuse de 18h00 à 22h00 UTC dans un rayon de 100km autour de la station.

L'étude des signaux obtenus montre que les données enregistrées sur le petit réseau acoustique sont plus riches et la cohérence entre les différents points du réseau est meilleure. Des fréquences caractéristiques associées aux dimensions des réseaux peuvent être définies (voir tableau 2). On constate que la taille du réseau de microphones est adaptée aux fréquences que l'on souhaite étudier (infrasons proches et acoustique). L'étude se concentre donc sur les données des microphones. Les signaux sont dépouillés à l'aide de l'algorithme opérationnel PMCC [4] dans la bande de fréquence de 1Hz à 40Hz. Cet algorithme construit par bandes de fréquences et au cours du temps un ensemble de détections acoustiques cohérentes au travers du réseau. Il fournit les azimuts θ , les angles d'élévations ϕ , les fréquences et les amplitudes acoustiques des sources ayant provoqué ces détections. Pour chaque éclair survenu près de la station acoustique durant l'orage, le LMA donne une datation temporelle ainsi qu'un ensemble de détections qui décrivent la géométrie tridimensionnelle fine de la décharge.

Pour chaque détection PMCC associée à cette décharge,

TABEAU 2 – Fréquences acoustiques associées à la géométrie des deux réseaux.

	réseau de microphones	réseau de microbaromètres
côté	50m	500m
fréquence	6.8Hz	0.68Hz
distance centre-sommet	28m	288m
fréquence	12Hz	1.2Hz

un temps de propagation en ligne droite Δt depuis une potentielle source qui a donné lieu à la détection, jusqu'à la station est déterminé en utilisant la datation de la décharge détectée par le LMA comme référence. La distance cartésienne $D = c_0 \Delta t$ (on pose $c_0 = 340\text{m/s}$) est alors introduite. Elle permet de définir une distance entre la source acoustique et la station. En utilisant l'azimut θ et l'angle d'élévation ϕ , il est possible de reconstruire la géométrie spatiale tridimensionnelle des détections acoustiques établies par l'algorithme PMCC.

3.2 Exemple de reconstruction

En exemple, on présente tout d'abord le cas d'une décharge de foudre qui a touché le sol, elle s'est produite à 20h35m00s UTC le 26 Octobre 2012 (figure 3). La décharge détectée par le LMA (points gris) a une extension de 20km dans l'axe Sud-Nord et de 10km dans l'axe Ouest-Est. Le LMA a détecté une couche horizontale de la décharge à une altitude de 5km environ, ainsi qu'une seconde couche horizontale à 2km d'altitude environ. Le point d'impact de la décharge au sol est à environ 2km de distance du centre de la station et est marqué par deux détections EUCLID associées à des arcs en retour de courant négatif (deux symboles 'triangle'). EUCLID a aussi détecté un arc en retour de courant positif (symbole 'croix'). La position des points acoustiques reconstruits montre que PMCC a correctement détecté la couche horizontale supérieure de la décharge. Il apparaît sur les graphiques associant la direction et l'altitude que les détections acoustiques ont suivi avec précision l'arc en retour lui-même et son chemin depuis le sol (détections acoustiques à environ 500m d'altitude) jusqu'à la partie haute de la décharge (5km d'altitude). La corrélation entre la position des points acoustiques à basse altitude et la position des détections EUCLID est excellente. On peut constater que l'arc en retour présente une forte inclinaison dans la direction Ouest-Est (graphique de l'altitude en fonction de la direction Ouest-Est), et apparaît comme vertical dans la direction Sud-Nord. La partie basse de l'arc en retour n'a pas été correctement détectée par le LMA : il y a peu de détections LMA pour des altitudes en dessous de 2km.

La figure 4 montre pour cette décharge plusieurs informations que donne l'algorithme PMCC. Le code couleur sur le graphique de gauche représente le temps écoulé à la station acoustique, on constate logiquement que les détections PMCC les plus éloignées de la station arrivent en dernier à la station. Durant les 8 premières secondes de la fenêtre de temps choisie (de 20h35m00s UTC à 20h36m05s UTC) l'algorithme PMCC a détecté la partie verticale de la décharge. Sur le graphique représentant les fréquences acoustiques dans la barre de couleur (colonne du milieu) on peut constater que les différentes étapes de la décharge (partie verticale et partie horizontale qui s'éloigne de la station) émettent un signal acoustique avec un spectre large, des détections PMCC à la fois haute fréquence et basse fréquence (de 1Hz à 40Hz) sont présentes. Enfin, le graphique colonne de droite montre que l'amplitude acoustique des détections PMCC diminue avec la distance. On peut en partie interpréter cela comme l'effet d'atténuation de l'amplitude acoustique au cours de la propagation, mais l'on ne peut pas conclure si les sources acoustiques dans la partie horizontale de la décharge émettent un signal d'amplitude plus faible.

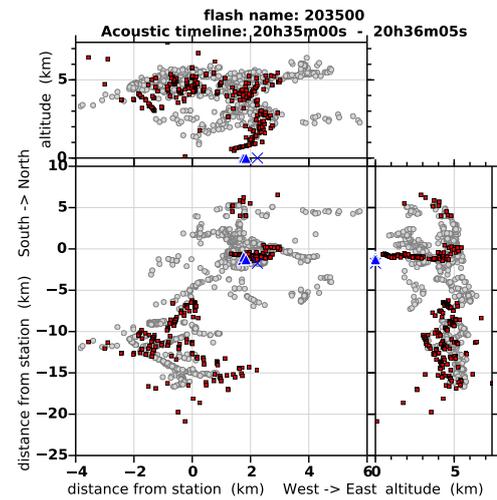


FIGURE 3 – Reconstruction de la décharge qui s'est produite à 20h35m00s UTC. Points gris : détections LMA, carrés rouges : détections PMCC reconstruites, symboles bleu : détections EUCLID. Le centre de la station acoustique est au point (0, 0). Le signal acoustique correspondant à cette décharge a été enregistré de 20h35m00s UTC à 30h36m05s UTC.

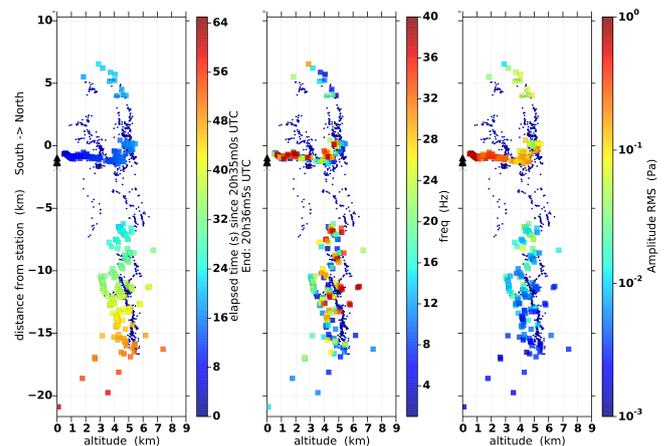


FIGURE 4 – Le graphique de l'altitude en fonction de la distance Sud-Nord permet de bien distinguer l'éclair. On trace sur cette vue les différentes données déterminées par PMCC pour la décharge qui s'est produite à 20h35m00 UTC. Colonne de droite datation temporelle des détections PMCC reconstruites. Colonne du milieu fréquence (Hz) des détections PMCC. Colonne de droite amplitude (Pa) des détections PMCC.

3.3 Contenu fréquentiel du signal de tonnerre

Le contenu fréquentiel des signaux de tonnerre enregistrés aux stations de microbaromètres et de microphones est maintenant étudié. Le graphique 5 trace le signal enregistré à la station du CEA par le microphone et le microbaromètre du centre du réseau. La fréquence minimale de 1Hz permet de s'affranchir des signaux de houle venant de l'océan Atlantique. Le spectre permet de constater que la réponse du modèle de microphone utilisé pour l'expérience et la réponse du modèle de microbaromètre est la même dans la gamme de fréquences commune de 1Hz à 20Hz. On montre aussi que les signaux de tonnerre présentent un contenu fréquentiel large. Les fréquences entre 1Hz et 20Hz ne sont pas négligeables par rapport au contenu de plus

haute fréquence.

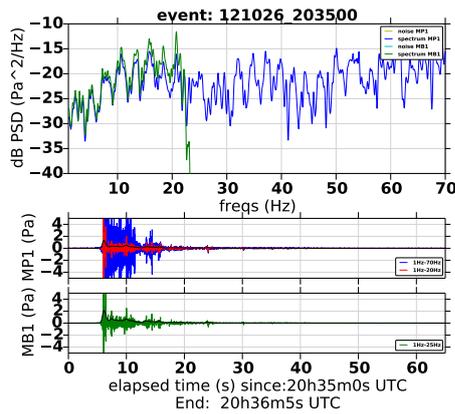


FIGURE 5 – En bas, signal de tonnerre enregistré sur le microphone (nommé MP1) du centre du réseau de microphones, et sur le microbaromètre (nommé MB1) du centre du réseau de microbaromètres. Pour le microphone MP1 on a tracé le signal dans deux bandes de fréquences : 1Hz–70Hz et 1Hz–20Hz. Le signal du microbaromètre est tracé pour la bande de fréquence 1Hz–25Hz. Figure du haut : spectres correspondants.

4 Résultats statistiques globaux

La méthode de reconstruction présentée a été appliquée avec succès sur les détections fournies par l'algorithme PMCC pour 56 décharges de foudre qui se sont produites entre 19h UTC et 22h UTC le 26 Octobre 2012 à moins de 100km du réseau de microphones. L'ensemble des données permet d'établir une étude statistique. La figure 6 donne la distribution des distances horizontales des détections LMA par rapport à la station. Le maximum d'activité électrique de l'orage était situé entre 20km et 25km de la station. L'histogramme à droite montre la distribution des détections acoustiques associées. Le rapport des nombres de détections est d'environ 1 détection acoustique pour 6 à 7 détections LMA. On constate que, de 0km à 25km de la station, la méthode acoustique a parfaitement suivi le nombre de décharges électromagnétiques. Entre 25km et 35km de la station, des détections acoustiques sont présentes mais en faible nombre (environ 2% de détections). Et au-delà de 40km, le nombre de détections acoustiques est très faible mais n'est pas nul. Au cours de l'orage une cellule orageuse est également passée entre 60km et 80km de la station, des détections PMCC y sont associées et leur reconstruction donne une distance horizontale cohérente (entre 65km et 70km) mais le nombre de ces détections est là encore très faible. Les cartes figure 7 montrent que durant l'orage de 20h UTC à 22h UTC, les décharges de foudre ont balayé tous les azimuts autour de la station acoustique. Entre 20h30m UTC et 20h40m UTC l'orage est juste au dessus de la station. La cellule orageuse située au Nord-Est de la station entre 50km et 75km n'est pas détectée par PMCC car elle est masquée par les décharges proches. Vers la fin de la tempête (21h40m UTC–21h50m UTC) une cellule orageuse passe au Sud-Est de la station à une distance entre 50km et 75km. Des détections acoustiques sont clairement associées aux points d'impact des éclairs sur le sol qui sont localisés par le réseau EUCLID. Les histogrammes figure 8

étudient la distribution des altitudes pour les détections LMA et les détections PMCC reconstruites. La distribution des détections LMA en altitude suit la distribution des poches de charges électriques à l'intérieur d'un nuage observée classiquement. Une première région de forte activité électrique est située entre 2km et 6km d'altitude, et une deuxième région d'activité électrique moindre est entre 8km et 12km d'altitude. On constate que la méthode acoustique n'a pas permis de différencier clairement ces deux régions. De nombreuses détections acoustiques sont associées à la partie basse des nuages d'orage entre 2km et 6km d'altitude. Le nombre de détections reconstruites

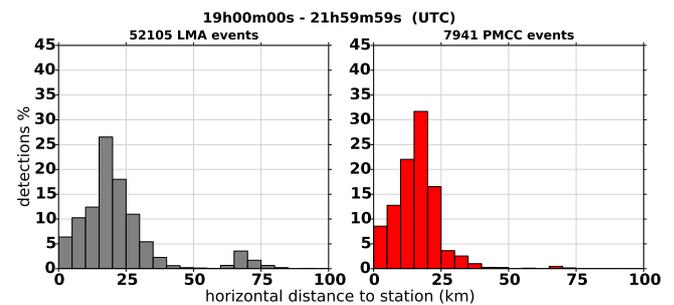


FIGURE 6 – Distribution pour l'ensemble de l'orage des distances horizontales des détections LMA (histogramme à gauche), et des distances horizontales pour les détections PMCC reconstruites (histogramme de droite). Le pas des histogrammes est de 5km.

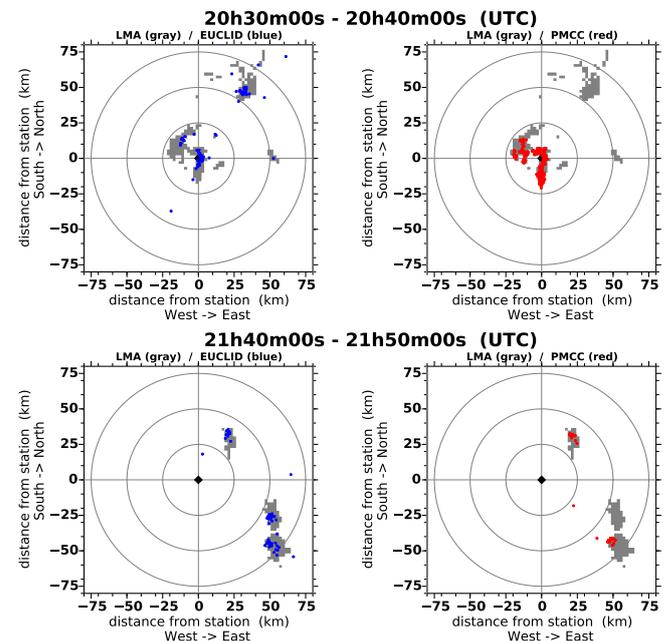


FIGURE 7 – Illustration pour 2 intervalles de dix minutes durant l'orage de la localisation des sources acoustiques reconstruites (points rouges). Les régions grisées sont les détections LMA, et les points bleus sont les détections EUCLID. La station acoustique est aux coordonnées (0,0) et est représentée par un losange noir.

entre 6km et 12km diminuent avec l'altitude mais de manière régulière, et le nombre important de détections entre 6km et 8km d'altitude n'est pas corrélé à une activité électrique forte. Enfin on peut voir que quelques détections acoustiques sont mal reconstruites et sont positionnées entre 11km et

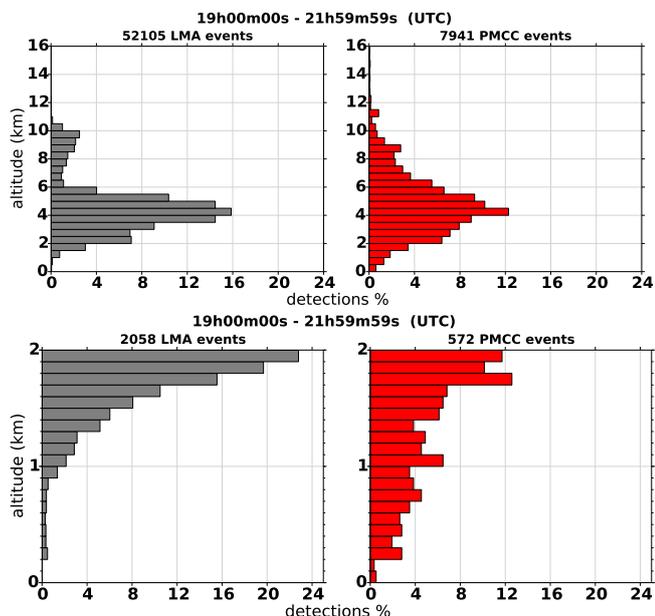


FIGURE 8 – Distribution pour l'ensemble de l'orage des altitudes des détections LMA (histogramme à gauche), et des altitudes pour les détections PMCC reconstruites (histogramme de droite). Le pas des histogrammes est de 500m. Et distribution des détections à basses altitudes entre 0km et 2km. Le pas des histogrammes est de 100m.

16km d'altitude. L'étude suivante (graphique deuxième ligne figure 8) montre que la méthode acoustique a très bien détecté la partie basse des éclairs entre 200m et 2km d'altitude. Ceci n'est pas le cas pour le LMA, la capacité de détection du réseau est fortement dégradée pour les basses altitudes. Nous montrons donc que la méthode acoustique apporte des informations complémentaires aux méthodes électromagnétiques pourtant plus résolues. La figure 9 montre la statistique des altitudes des détections en fonction de la distance à la station acoustique. Entre 0km et 5km de distance : les sources acoustiques de basse altitude sont parfaitement suivies. Entre 5km et 20km, le nombre de sources acoustiques reconstruites entre 0km et 2km d'altitude diminue. On peut voir que le nombre de sources acoustiques erronées reconstruites entre 11km et 16km d'altitude augmente avec la distance horizontale à la station acoustique. Ce biais est présent dès 10km de distance. Au delà de 20km de distance, l'hypothèse d'une propagation en ligne droite ne suffit plus, et la méthode acoustique localise systématiquement trop haut les sources acoustiques reconstruites.

5 Apport de la simulation numérique pour l'aide à l'interprétation des reconstructions acoustiques

Les biais de reconstruction acoustique pour les sources les plus lointaines sont étudiés à l'aide de la simulation numérique. Une source ponctuelle de forme gaussienne (largeur à mi-hauteur de 70m) est placée à différentes altitudes de 0km à 10km par pas de 1km.

L'échelle caractéristique de la tortuosité des éclairs étant de 70m à 100m environ [9], cette source permet de décrire de manière simple un segment d'éclair. Elle

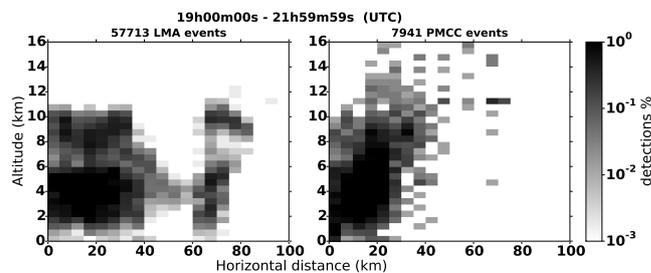


FIGURE 9 – Distribution pour l'ensemble de l'orage des altitudes des détections LMA (histogramme à gauche), et des altitudes pour les détections PMCC reconstruites (histogramme de droite). Les canaux de l'histogramme ont pour largeur 500m pour les altitudes et 5km pour les distances horizontales.

émet une forme d'onde de Kinney avec une fréquence principale de 10Hz et un maximum de surpression de 1000Pa. La forme d'onde acoustique est propagée sur 50km à l'aide d'un code de propagation d'onde de choc acoustique en atmosphère réaliste nommé Floward [10]. Ce code résout analytiquement par spectre angulaire la propagation en milieu homogène, il prend en compte un milieu hétérogène contenant des contrastes de température (fluctuations de célérité du son et de densité), un profil de vent cisailé et ses gradients verticaux. La formation et la propagation de chocs acoustiques faibles est aussi calculée. Afin d'étudier les altitudes reconstruites pour les sources les plus distantes observées entre 21h40m UTC et 21h50m UTC dans la direction Sud-Est (azimut 135°), les réanalyses des profils de vent et de célérité du son calculés par le code AROME-WMED sont utilisées (voir figure 10). Pour chaque pas de propagation, l'angle d'élévation du front d'onde acoustique qui arrive au sol est calculé à l'aide d'une corrélation croisée sur le signal complet entre deux pas de calculs successifs. Connaissant cet angle et la distance de propagation, une altitude de la source peut être calculée. Cette altitude est comparée à l'altitude vraie choisie pour le cas de simulation. Les résultats figure 10 illustrent que pour les sources situées à plus de 20km d'une station acoustique, l'altitude reconstruite, pour une propagation en ligne droite, est systématiquement surestimée pour les sources proches du sol. Mais pour une source à plus haute altitude l'erreur sur la reconstruction est moins importante. Ces résultats tendent à indiquer que les détections PMCC reconstruites entre 10km et 16km d'altitude (voir figure 9) correspondent à des sources de basses altitudes, pour lesquelles les fronts d'ondes acoustiques sont fortement déviés par les effets de guide d'onde dus au vent près du sol. Des études plus poussées sont en cours de réalisation.

6 Conclusion

La méthode acoustique montre très clairement que les signaux de tonnerre couvrent un spectre large depuis les infrasons jusqu'au contenu fréquentiel de plus haute fréquence. Les réseaux acoustiques de petite taille sont capables de suivre avec précision la géométrie fine des éclairs pour les décharges les plus proches des stations acoustiques. Ils apportent des informations que ne donnent pas les outils électromagnétiques (tels que le LMA) pourtant plus résolu en temps et en espace. En particulier, les

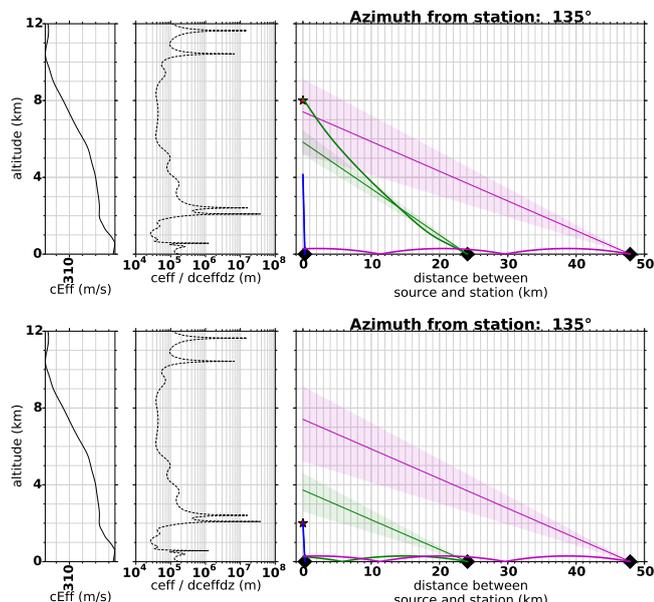


FIGURE 10 – En haut : cas d’une source explosive à 8 km d’altitude. En bas : source à 2 km d’altitude. A gauche : profil de célérité effective (trait épais) à la verticale de la station acoustique dans l’azimut Sud–Est. Puis en trait pointillés : grandeur $c_{eff} / \nabla_{altitude}(c_{eff})$. Graphiques de droite : trois cas (bleu, vert, violet) de distance horizontale de la station acoustique (représentée par un losange noir) à la source (étoile rouge). Traits fins : reconstruction acoustique avec une hypothèse de propagation en ligne droite à la célérité du son $c_0 = 340$ m/s (traits fins), les régions colorées représentent les écarts sur l’altitude calculée pour une variation de $c_0 \pm 2$ m/s. Traits épais : reconstruction calculée à partir d’une loi de Snell-Descartes appliquée au profil c_{eff} .

parties à basse altitude des décharge proches sont très bien reconstruites avec l’hypothèse simple d’une propagation en ligne droite en atmosphère homogène. Les détections acoustiques pour les décharges plus lointaines (jusqu’à 70 km) sont correctement positionnées en azimut et en distance horizontale. Elles correspondent très clairement aux positions des détections EUCLID, donc aux positions des arcs en retour. Mais une surestimation importante est commise sur l’altitude reconstruite. Cette erreur est interprétée à l’aide d’un code de propagation acoustique non linéaire en atmosphère hétérogène avec écoulement. Les premiers résultats de simulation indiquent que les guides d’onde créés par les cisaillements de vent près du sol ont un fort impact sur les angles d’élévations des fronts d’ondes acoustiques pour les sources à basse altitude et conduisent à reconstruire celles-ci trop haut par rapport à leur altitude réelle.

7 Remerciements

La campagne d’observations HyMeX–SOP1 pour l’électricité atmosphérique a été soutenue par les bourses MISTRALS/HYMEX et par le projet ANR-11-BS56-0005 IODA-MED.

Références

- [1] R. O. Arechiga, J. B. Johnson, H. E. Edens, R. J. Thomas, and W. Rison. Acoustic localization of triggered lightning. *J. Geophys. Res. : Atmos.*, 116(D9) :D09103 (1–11), May 2011.
- [2] J. D. Assink, L. G. Evers, I. Holleman, and H. Paulssen. Characterization of infrasound from lightning. *Geophys. Res. Lett.*, 35(15) :L15802 (1–5), August 2008.
- [3] P. Campus and D. R. Christie. Worldwide Observations of Infrasonic Waves. In A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, editors, *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, pages 185–234. Springer, 2009.
- [4] Y. Cansi. An automatic seismic event processing for detection and location : The P.M.C.C. Method. *Geophys. Res. Lett.*, 22(9) :1021–1024, May 1995.
- [5] P. Drobinski, V. Ducrocq, P. Alpert, E. Anagnostou, K. Béranger, M. Borga *et al.* HyMeX, a 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, in revision, early online release, 2013.
- [6] V. Ducrocq, I. Braud, S. Davolio, R. Ferretti, C. Flamant, A. Jansa *et al.* HyMeX-SOP1, the field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, submitted, early online release, 2013.
- [7] T. Farges and E. Blanc. Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas. *J. Geophys. Res. : Space*, 115 :A00E31 (1–17), June 2010.
- [8] A. A. Few. Lightning Channel Reconstruction from Thunder Measurements. *J. Geophys. Res.*, 75(36) :7517–7523, December 1970.
- [9] A. A. Few. Acoustic Radiations from Lightning. In H. Volland, editor, *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, volume 2, pages 1–31. CRC Press, April 1995.
- [10] L.-J. Gallin, M. Rénier, E. Gaudard, R. Marchiano, F. Coulouvrat, and T. Farges. One-way approximation for the simulation of weak shock wave propagation in atmospheric flows. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2014. Accepted paper.
- [11] P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, W. Rison, T. Hamlin, J. Harlin, and M. Davis. GPS-based mapping system reveals lightning inside storms. *Eos Trans. AGU*, 81(3) :21–25, January 2000.
- [12] D. R. MacGorman, A. A. Few, and T. L. Teer. Layered Lightning Activity. *J. Geophys. Res. : Oceans*, 86(C10) :9900–9910, October 1981.
- [13] Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier *et al.* The AROME-France convective scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, 139 :976–999, March 2011.