

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Infrasons des éclairs et des sprites : caractéristiques et intérêts pour la validation de modèles de propagation

Thomas Farges et Elisabeth Blanc

CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, FRANCE, thomas.farges@cea.fr

Les éclairs d'orage et les sprites (phénomènes lumineux transitoires qui se produisent au-dessus des zones orageuses) génèrent des ondes acoustiques infrasonores. Les études sur les infrasons des éclairs sont menées depuis les années 1960 mais regagnent en intérêt depuis les années 1990 avec la mise en place du réseau de surveillance pour la vérification du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires. Les sprites ont été découverts et commencés à être étudiés au milieu des années 1990. Des infrasons produits par les sprites constituent une source intéressante car elle est située à haute altitude. L'intérêt de l'étude des éclairs est la multiplicité des sources. Il est établi que des infrasons produits par les éclairs sont mesurables jusqu'à des distances de l'ordre de 80 km des capteurs en propagation directe et à des distances supérieures à 200 km lorsque la propagation s'effectue dans le guide d'onde. Les éclairs sont datés et localisés précisément par les réseaux de détection des éclairs européens. La zone de silence peut donc être très bien caractérisée en utilisant comme source les éclairs d'orage puisqu'ils émettent continuellement en amont et en aval de cette zone. L'intérêt de l'étude des sprites est que la source est étendue horizontalement (jusqu'à 100 km) et verticalement entre 40 et 80 km d'altitude. Cette source permet d'étudier l'impact de la météorologie sur la propagation dans le guide d'onde. Dans une première partie nous présenterons les principales caractéristiques des infrasons des éclairs et des sprites. Nous décrirons brièvement les différents modèles de source pour ces deux classes d'événements. Enfin, nous insisterons sur l'intérêt de ces mesures vis-à-vis de la validation des modèles de propagation et des applications possibles.

1 Introduction

La plupart des études sur le tonnerre ont été réalisées entre 1960 et 1985. Elles ont montré qu'étaient associées aux ondes sonores des ondes infrasonores, c'est-à-dire dont la fréquence est inférieure à 20 Hz. Néanmoins, tout n'est pas encore connu à propos des infrasons des éclairs ; leur mécanisme source reste encore en discussion. Il y a une quinzaine d'années, les mesures infrasonores ont été choisies comme l'une des quatre technologies pour vérifier l'application du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE) [1]. Ce choix a relancé les recherches basées sur les mesures infrasonores et plus particulièrement a permis le développement de nouveaux capteurs, de nouvelles techniques de traitement du signal et des modèles de propagation. Les stations composées de plusieurs capteurs (microbaromètres) permettent de mesurer les caractéristiques des ondes se propageant au-dessus d'elles comme l'azimut d'arrivée ou la vitesse de phase.

C'est en 1989 que fut observé, par hasard et pour la première fois, un phénomène lumineux transitoire au dessus des zones orageuses, appelé en anglais sprite [2]. Les sprites sont des décharges qui se produisent entre 40 et 90 km d'altitude. Ils s'étendent horizontalement entre 1 et 50 km. Ils ne durent que quelques millisecondes et se produisent après un éclair nuage-sol positif (c'est-à-dire que ce sont les charges positives du nuage qui sont neutralisées lors de la décharge) [3].

Dans une première partie nous présenterons les caractéristiques et les mécanismes des infrasons générés par les éclairs et les sprites. Dans une seconde partie, nous montrerons, à l'aide d'un exemple d'orage mesuré en 2005, que les éclairs peuvent permettre d'imager efficacement la

propagation acoustique dans les 300 premiers kilomètres autour d'une source. Dans une troisième et dernière partie, nous montrerons l'intérêt qu'a ce type de données pour la validation d'une chaîne de calcul prenant en compte le mécanisme source, la propagation et la météorologie.

2 Caractéristiques et mécanismes source des infrasons des éclairs et des sprites

2.1 Caractéristiques des infrasons des éclairs

L'objet de cet article n'est pas de faire une revue des travaux réalisés sur le tonnerre, le lecteur intéressé pourra lire le chapitre dédié dans le livre suivant [4].

La plupart des expériences, qui ont eu lieu entre les années 1960 et 1980, mesuraient la partie sonore des ondes acoustiques émises par la foudre. Le tonnerre peut être entendu jusqu'à environ 25 km de l'éclair alors que sa partie infrasonore est mesurable jusqu'à au moins 50 km [5]. La surpression induite par la foudre à une distance de quelques kilomètres est comprise entre 0.2 et 2.4 Pa. L'onde acoustique est composée de plusieurs pics ; chaque pic durant de 0.2 à 2 s. En moyenne, deux à quatre pics sont enregistrés par éclair avec un écart temporel de 1 à 3 s entre chaque pic. La durée du tonnerre émis par un seul éclair est donc d'une dizaine de secondes. Les sources sont les éclairs nuage sol ou intranuages. Il a été possible, dans les années 1970, de mesurer et localiser pour la première fois l'activité électrique intranuage à partir de mesures d'infrason alors que ce n'était pas possible avec des moyens optiques (absorption de la lumière par le nuage) ou

électromagnétiques (manque de précision dans la mesure) [6].

Du point de vue fréquentiel, le tonnerre présente des maxima entre 4 et 125 Hz [7]. Les décharges intranuage produisent des ondes ayant un maximum dans leur spectre autour de 28 Hz alors que les décharges nuage-sol génèrent des ondes de plus haute fréquence à 50 Hz. Néanmoins, pour une émission, générée par le même éclair, deux maxima ont pu être observés : entre 40 et 60 Hz et en dessous de 20 Hz (dans la gamme infrasonore). Une variation temporelle du contenu spectral est également observée. Un exemple d'infrason d'éclair est donné sur la Figure 1.

2.2 Mécanismes source des infrasons des éclairs

La principale différence entre les ondes acoustiques audibles et infrasonores se situe au niveau des processus physiques. Le tonnerre audible est dû au rayonnement acoustique du canal d'ionisation chauffé à plus de 10 000 K alors que les émissions infrasonores sont dues à la conversion de l'énergie électrostatique du nuage en onde acoustique.

L'air chauffé dans le canal d'ionisation produit une onde de choc qui, plusieurs mètres au-delà du canal, se transforme en l'onde en N qui est effectivement mesurée [8]. Cette théorie explique pourquoi le spectre du tonnerre présente un maximum autour de 50 Hz, mais ne peut expliquer l'amplitude du signal infrasonore.

Un autre processus physique a été proposé pour expliquer ces ondes infrasonores [9]. Le champ électrostatique produit une dépression à l'intérieur de la région chargée du nuage qui est brutalement annulée quand la décharge a lieu. Le calcul prédit une amplitude au sol comprise entre 0.05 et 5 Pa et une fréquence comprise entre 0.2 et 2 Hz. L'amplitude dépend de la quantité de charges à l'intérieur du nuage et la fréquence de l'onde de la dimension du nuage. Le diagramme de rayonnement de cette onde est très vertical, ce qui signifie que seul un capteur situé sous le nuage d'orage peut mesurer cette onde. Les mesures réalisées à proximité d'un éclair [10] montrent qu'une telle onde peut être produite. Néanmoins, une phase préliminaire de surpression est mesurée et n'est pas prévue par le modèle. Deux propositions ont été proposées pour expliquer cette surpression : un préchauffage de l'air par des streamers, ou filaments, positifs pendant la décharge [11] ou la croissance de la densité de charge dans le nuage dans les secondes précédant la décharge [12]. Une modélisation à 2D, tenant compte du second mécanisme, montre qu'effectivement cette onde n'est plus mesurable au-delà de quelques kilomètres du nuage d'orage [13].

2.3 Caractéristiques des infrasons des sprites

La possibilité d'une émission acoustique liée aux sprites a été proposée très vite après la découverte de ce phénomène [14] et une signature possible a été proposée [15]. Une première corrélation positive entre une observation de sprite et des infrasons a été réalisée en 2003 [16] lors de la première campagne d'observation coordonnée en France [17]. Les sprites étaient alors situés à environ 400 km à l'est de la station infrasonore, c'est-à-dire dans la direction de propagation favorisée par les vents stratosphériques. Cette étude montre que le délai entre l'instant d'observation du sprite et la mesure d'infrason est compatible avec le temps de propagation d'une onde

acoustique émise entre 60 et 80 km d'altitude (Figure 1). La signature spectrale se caractérise par un changement de la fréquence du signal avec le temps. L'amplitude de ces ondes est comprise entre 0.01 et 0.1 Pa. Leur durée est très différente de celle des éclairs : plusieurs dizaines de secondes (30-150) au lieu d'une dizaine pour les infrasons des éclairs. Cette durée est corrélée avec l'extension horizontale des sprites, et est donc caractéristique de la dimension de la source. Des infrasons de ce type ont également été détectés jusqu'à environ 1000 km de la station infrasonore [17].

2.4 Mécanisme source des infrasons des sprites

Le changement de la fréquence en fonction du temps à l'intérieur d'un même signal est l'une des propriétés des infrasons des sprites détectés à des distances de plusieurs centaines de kilomètres. Cette caractéristique peut s'expliquer par la propagation des infrasons et par la taille de la source [16]. La dispersion en fréquence – les basses fréquences arrivant avant les hautes – peut être due aux chemins de propagation différents suivis par l'onde. La thermosphère agit comme un filtre passe bas sur les ondes se réfractant dans cette partie de l'atmosphère ; la fréquence de coupure augmente avec l'altitude. Le changement de fréquence peut s'expliquer par l'extension horizontale des sprites car l'onde venant du bord le plus proche du sprite (par rapport aux capteurs) se réfléchit à une altitude plus haute que celle issue du bord du sprite le plus lointain et voit donc son contenu haute fréquence plus atténué que celui de l'onde issue du bord le plus lointain.

Un chauffage réaliste de l'air d'un pourcent à 80 km d'altitude dans une colonne cylindrique verticale et ayant pour rayon quelques dizaines de mètres (en accord avec ce que l'on connaît à l'heure actuelle de la morphologie des sprites) est suffisant pour générer un signal ayant l'amplitude mesurée au sol [18].

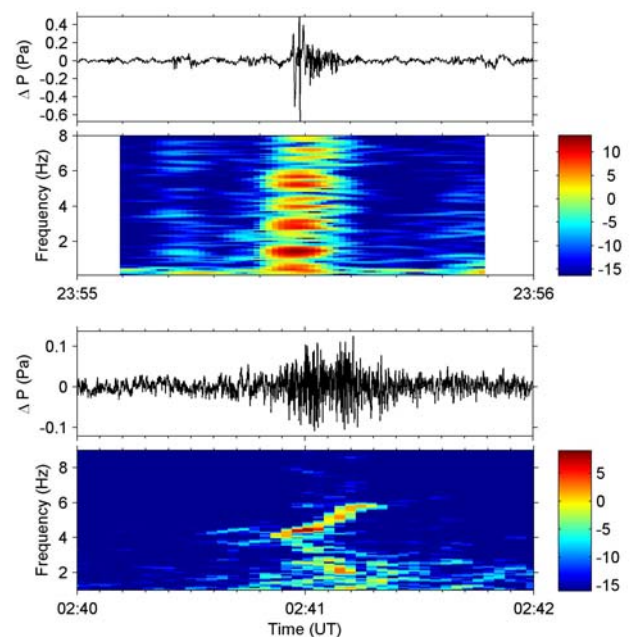


Figure 1 : (haut) infrason d'un éclair distant de quelques kilomètres mesuré le 31/08/2005 et son spectrogramme (la couleur indique l'amplitude en dB) (bas) infrason de sprite distant d'environ 400 km mesuré le 21/07/2003 et son spectrogramme.

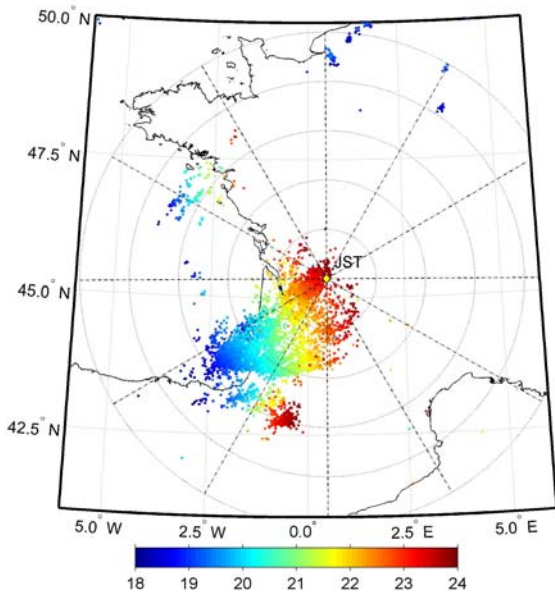


Figure 2 : Activité orageuse enregistrée par Météorage le 9 septembre 2005 entre 18 et 24 heures TU. L'emplacement de la station de St Just (JST) est symbolisé par un losange jaune. Les cercles concentriques indiquent la distance à cette station avec un écart de 100 km entre chaque cercle. La couleur indique le temps en TU.

3 Mesures d'infrasons d'éclairs et de sprites réalisés en 2005

3.1 Campagne Eurosprite 2005

Pour étudier les sprites et leur relation avec les orages, des campagnes européennes d'observation sont organisées depuis 2000. En 2005, un grand nombre de capteurs utilisant différentes technologies ont été mis en œuvre (caméras, antennes électromagnétiques, radars météorologiques, ...) [17,19].

Le CEA a installé une station infrasonore à Saint Just (JST) dans le sud-ouest de la France (45°20'N, 0°30'E). La station a fonctionné du 12 août au 31 octobre 2005. Trois microbaromètres ont été disposés en un triangle de 1 km de côté avec un capteur supplémentaire en son barycentre. Chaque capteur mesure la pression relative locale avec une sensibilité de 10^{-3} Pa, une bande passante de 0.01 à 27 Hz et une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz. Des mesures de la vitesse et de la direction du vent sont effectuées au point central de la station. Nous disposons pour toute la campagne de mesure des localisations d'éclair nuage-sol effectuées par Météorage.

3.2 Analyse de l'orage du 9 septembre 2005

Nous nous concentrons dans cet article sur l'étude de l'orage du 9 septembre (Figure 2). Plus de 10 000 éclairs ont été localisés entre 18 h et 24 h à moins de 300 km de JST et plus de 1 300 éclairs se sont produits à moins de 50 km. L'orage vient du Sud-Ouest et se dirige vers le Nord-Est.

Les signaux enregistrés par les quatre capteurs sont analysés avec la méthode d'intercorrélation PMCC [20]. Cette méthode permet de détecter les ondes qui se propagent de manière cohérente sur la station et de calculer

pour chaque détection l'angle d'arrivée – azimut – et la vitesse de phase. On compare, sur la Figure 3, en fonction du temps l'azimut des infrasons détectés avec l'azimut des éclairs détectés par Météorage. On constate que les événements infrasonores détectés par la station JST ont une parfaite corrélation avec les éclairs quand ceux-ci sont proches de la station (jusqu'à ~100 km) ou au-delà de ~200 km. Entre 23h30 et 23h50, l'absence de détection est liée à une bourrasque de vent montant jusqu'à 5 m/s qui a rendu impossible la détection des infrasons des éclairs à cause du bruit trop important lié au vent (Figure 4). Dans un autre cas, il a été possible de mesurer les infrasons des éclairs proches de la station en absence de bourrasque de vent [21].

Pour éviter la confusion avec d'autres infrasons produits par la houle dont la fréquence principale est autour de 0.2 Hz, nous filtrons le signal infrasonore autour de 1 Hz pour déterminer à partir de quelle distance les éclairs sont détectés par le capteur (Figure 4.a). On voit très clairement que le signal dépasse le bruit de fond (inférieur à -20 dB) vers 22h quand l'orage est situé à 80-100 km de JST (Figure 4.c). Cette mesure confirme des observations récentes [5].

Le taux de détection des infrasons des éclairs (Figure 4.b) augmente quand les éclairs sont à moins de 100 km de la station entre 22h et 24h. Une autre augmentation plus faible est observée lorsqu'ils sont entre 200 et 275 km avant 21 h. Le pic à 19h30 est probablement associé à la très forte activité orageuse observée à 250 km de JST quelques minutes auparavant. Le taux de détection entre 21h et 22h est proche de zéro alors que l'orage se trouve entre 80 et 200 km.

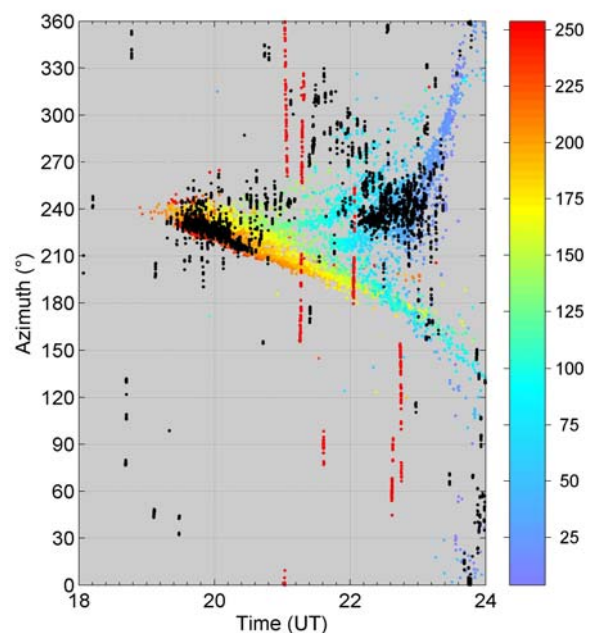


Figure 3 : Comparaison de l'azimut des éclairs (points colorés – la couleur indique la distance (en km) des éclairs par rapport à JST) à l'azimut des détections infrasonores (points noirs : éclair, points rouges : sprites).

La proportion d'éclairs détectés est de l'ordre de 2%. Plusieurs raisons expliquent cette faible proportion. Météorage considère indépendamment toutes les décharges nuage-sol, or la plupart des éclairs sont composés de 3 à 5 décharges se produisant au même endroit et dans la même seconde. Du point de vue des infrasons, nous ne percevons qu'un seul événement. La proportion peut donc être portée

de 6 à 10 %. De plus, la durée d'un infrason d'éclair étant d'environ 10 s, au maximum 30 infrasons d'éclairs sont identifiables par intervalle de 5 minutes. Enfin, un grand nombre d'éclairs ne peut pas être détecté à cause d'un rapport signal à bruit trop faible. Un infrason produit par un éclair qui est plus proche de la station que le reste de l'orage est détectable (car son amplitude est plus grande car il est plus proche de la station). A l'opposé, le signal généré par un éclair situé au milieu ou à l'arrière de l'orage vis-à-vis de la station, sera difficilement détectable et contribuera à accroître le bruit de fond.

Certains infrasons détectés pendant cette nuit avaient des caractéristiques très particulières : longue durée (plusieurs dizaines de secondes), grande extension azimutale (jusqu'à 130°) et vitesse de phase élevée. Nous les avons fait ressortir en les représentant avec des points rouges (Figure 2). Le fait qu'ils aient une vitesse de phase élevée, donc un angle d'élévation fort, et qu'au moment de leur mesure les éclairs soient très éloignés de JST (entre 100 et 200 km) indique que la source se situe à haute altitude. En utilisant les azimuts et angles d'élévation calculés, en faisant une hypothèse sur le temps de la source (éclair nuage-sol positif parent identifié dans la base de données de Météorage) et en utilisant des simulations de propagation par tracé de rayon, nous montrons que les sources de ces infrasons se trouvent entre 40 et 100 km d'altitude, leur extension horizontale atteint ~150 km (Figure 5). Elles sont très probablement associées à des sprites qui ont également été observés au dessus de cet orage [21]. Ces mesures sont donc les premières obtenues pour des sprites s'étant produit à proximité d'une station infrasonore (moins de 200 km).

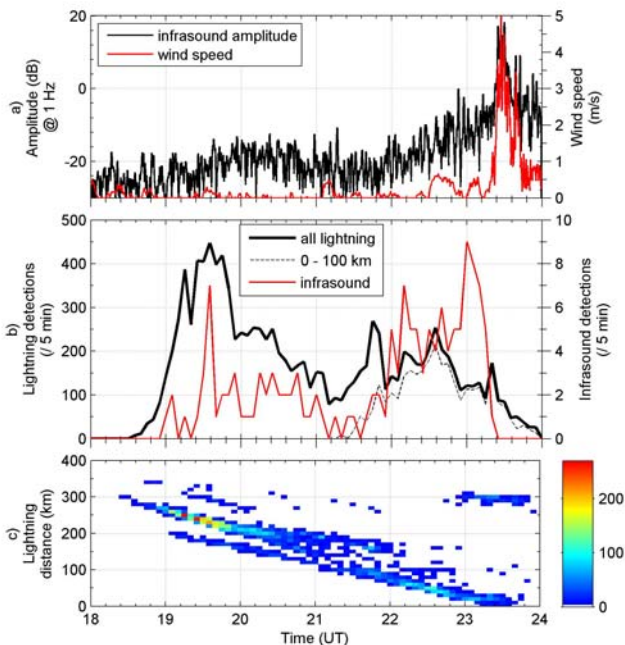


Figure 4 : (a) Comparaison de l'amplitude des signaux infrasonores filtrés autour de 1 Hz avec la vitesse du vent mesuré au sol (b) Comparaison du taux de détection par pas de 5 minutes des éclairs par Météorage (trait plein gras : tous les éclairs, tirets : uniquement ceux à moins de 100 km de JST) avec le taux de détection d'infrason d'éclair sur le même intervalle de temps (c) distribution spatiale et temporelle des éclairs par pas de 5 minutes et de 10 km.

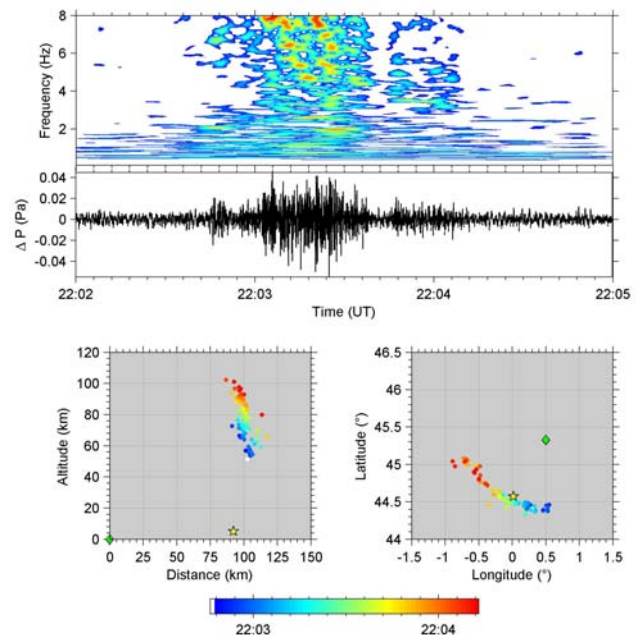


Figure 5 : (haut) Signal infrasonore associé à un sprite et son scalogramme, (en bas à gauche) : Localisation de l'origine des infrasons au niveau de la structure du sprite : Altitude en fonction de la distance horizontale à JST, (en bas à droite) : carte des projections sur la surface du sol. Le losange vert indique la position de JST et l'étoile jaune celle de l'éclair.

4 Intérêt de la mesure des éclairs et des sprites pour la validation des modèles de propagation

Les modèles de propagation sont importants à divers titres pour l'étude des éclairs et des sprites. Nous l'avons vu plus haut pour reconstituer la localisation des sources infrasonores des sprites, nous avons fait appel à un calcul de tracé de rayon tenant compte d'une météorologie réaliste (c'est-à-dire compatible avec les tendances statistiques d'un début de mois de septembre). Pour l'étude des éclairs, une bonne connaissance de la propagation est également nécessaire pour retrouver la localisation des sources électromagnétiques mesurées avec des instruments comme le Lightning Mapping Array [22].

Une bonne connaissance de la propagation est aussi recherchée pour l'étude des modèles de source. Nous avons vu dans la partie 2, que les modèles de source pour la partie infrasonore de l'onde de choc qui explique bien le tonnerre audible est sous évaluée par ce modèle par rapport à ce qui est mesuré. Par contre, le modèle de conversion de l'énergie électrostatique en énergie acoustique ne permet d'expliquer que les mesures effectuées juste en dessous du nuage dans lequel se produit l'éclair. Or nous venons de montrer clairement que des infrasons liés aux éclairs sont mesurés en propagation directe jusqu'à au moins 50 km des éclairs. Le mécanisme expliquant les émissions infrasonores des éclairs n'est donc pas encore complètement identifié. Il faut donc prendre en compte d'autres mécanismes soit au niveau de la source soit au niveau de la propagation pour expliquer ces mesures à longue distance. Concernant la propagation, on peut envisager différentes pistes comme la prise en

compte d'une météorologie plus fine dans la troposphère (tant spatialement – dans tous les axes – que temporellement) ou l'interaction des infrasons avec les turbulences liées à l'orage.

Pour donner un exemple des acquis et des progrès que l'on peut atteindre concernant la modélisation, nous avons réalisé un calcul de tracé de rayon avec la même météorologie réaliste que pour les sprites pour imager la zone de détection d'un éclair. Nous avons simplifié le problème en considérant l'éclair comme une source ponctuelle localisée à 4 km d'altitude (Figure 6). On voit très clairement que jusqu'à une cinquantaine de kilomètres la propagation directe permet d'expliquer les détections trouvées sur les Figures 2 et 3. Une très grande zone de silence est trouvée entre 50 et 260 km. Nos mesures montrent que la zone de silence est plus étroite (au moins entre 80 et 200 km). Enfin, les détections que nous avons trouvées entre 200 et 300 km sont dues à une propagation thermosphérique. On comprend dès lors la faiblesse des signaux reçus et leur important filtrage liés à leur réfraction dans la thermosphère. L'utilisation de la météorologie du jour de la mesure devrait nous permettre de nous rapprocher des mesures. Cependant, comme cela a été démontré pour une expérience réalisée lors d'une explosion chimique de très forte puissance [23], d'autres techniques de modélisation de la propagation sont plus à même de représenter la zone de silence (code parabolique). Enfin, des études plus statistiques pourraient également être réalisées pour faire ressortir quels sont les termes dominants dans la variabilité des mesures.

Les éclairs sont donc intéressants par la multiplicité des sources dans un même orage. Au lieu d'avoir une source et une multitude de capteurs pour pouvoir caractériser la propagation, il nous suffit d'une seule station et d'un ou plusieurs orages pour couvrir efficacement toute une plage de distance (inférieure à 500 km) et toutes les directions d'arrivée. L'intérêt des sprites, malgré leur rareté par rapport aux éclairs, est d'avoir des sources étendues en altitude. Nous pouvons donc tester les performances d'une chaîne de calcul comprenant un modèle de source et de propagation.

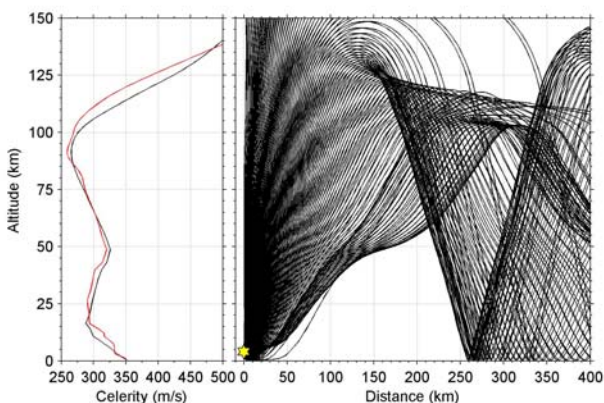


Figure 6 (à gauche) : profil vertical de la vitesse du son (noir) et de la célérité effective (vitesse du son modifiée par le vent local dans la direction Nord-est) tenant compte des caractéristiques météorologiques d'un début de mois de septembre, (à droite) : résultat d'un calcul de propagation, dans la direction Nord-est, par tracé de rayon utilisant le profil de célérité effective ci-contre et une source ponctuelle à 4 km d'altitude (étoile jaune) émettant de manière homogène.

Des modélisations et des mesures spécifiques dans le cadre d'une campagne de mesure prévue à l'automne 2012 en France sont en préparation. La campagne de mesure se déroulera dans le cadre de la proposition PEACH (Projet Electricité Atmosphérique pour la Campagne HyMeX) [24] où une station infrasonore sera installée au centre d'un important dispositif de mesure électromagnétique de la foudre et de mesures météorologiques (radars météo).

5 Conclusion

Nous avons rappelé dans le début de cet article les principales caractéristiques des infrasons des éclairs et des sprites. Nous avons également brièvement présenté les mécanismes source proposés pour expliquer ces phénomènes. Nous avons ensuite montré, à l'aide de l'exemple d'une expérience réalisée en 2005, que les infrasons des éclairs pouvaient être mesurés à des distances beaucoup plus importantes qu'on ne l'imaginait auparavant. Ces très nombreuses détections font apparaître que la propagation est un élément fondamental dans la capacité de détecter des signaux. Ces résultats montrent également que les calculs de propagation nécessitent des modèles précis de vent et de température sans quoi la limite de détection, notamment dans la zone de silence est mal décrite. De tels modèles sont maintenant accessibles jusqu'à des altitudes de l'ordre de 60 km [25]. La propagation directe des éclairs peut donc être correctement modélisée, permettant d'avoir des informations précises sur la source (la décharge). A des distances supérieures à 200 km, l'impact de la propagation dans la chaîne de simulation (modèle de source et de propagation) pourra être plus important.

Cette validation de la chaîne de simulation des émissions acoustiques des éclairs a un impact important pour l'étude des éclairs d'un point de vue global. En effet, nous pourrions ainsi détecter, localiser et caractériser ces derniers en utilisant les données infrasonores du réseau de l'organisation du TICE qui sera composé de 60 stations réparties de manière homogène sur toute la planète (fin 2009, 70% de ces stations étaient opérationnelles). Chaque station sera, ou est d'ores et déjà, un observatoire des éclairs situé, parfois, dans des lieux où l'activité orageuse est la plus forte au monde (Afrique, Amérique du Sud, Indonésie) alors que les réseaux de détection électromagnétique, comme Météorage, ne couvrent absolument pas ces zones. La diversité de l'activité orageuse et sa variation temporelle pourront être étudiées avec ces stations.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du réseau européen de formation par la recherche "Coupling of Atmospheric Layers", No.: HPRN-CT-2002-00216. Les auteurs remercient P. Herry, pour l'utilisation de PMCC sur les données, D. Ponceau et V. Flavin pour l'installation de la station de St Just, et Météorage pour l'accès temps réel aux données d'éclairs pour le Sud de l'Europe.

Références

- [1] Vivas Veloso, J. A., D. R. Christie, P. Campus, M. Bell, T. L. Hoffmann, A. Langlois, P. Martysevich, E. Demirovik, J. Carvalho, and A. Kramer, Status

- report on the establishment of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) International Monitoring System (IMS) infrasound network, *J. Acoust. Soc. Am.*, 112, 2352–2352, 2002.
- [2] Sentman, D. D., E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1205–1208, 1995.
- [3] Neubert, T., On sprites and their exotic kin, *Science*, 300, 747-749, 2003.
- [4] Rakov, V.A., and M. A. Uman, *Lightning, Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003.
- [5] Assink, J. D., L. G. Evers, I. Holleman, and H. Paulssen, Characterization of infrasound from lightning, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L15802, doi:10.1029/2008GL034193, 2008.
- [6] MacGorman, D.R., A.A. Few, and T.L. Teer, Layered lightning activity, *J. Geophys. Res.*, vol. 86, 9900-9910, 1981.
- [7] Holmes, C. R., M. Brook, P. Krehbiel, and R. McCrory, On the power spectrum and mechanism of thunder, *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 2106-2115, 1971.
- [8] Few, A. A., Acoustic radiations from lightning, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2, edited by H. Volland, pp. 1– 31, CRC Press, Boca Raton, Fla; 1995.
- [9] Dessler, A. J., Infrasonic thunder, *J. Geophys. Res.*, vol. 78, 1889-1896, 1973.
- [10] Balachandran, N. K., Infrasonic signals from thunder, *J. Geophys. Res.*, 84, 1735–1745, 1979.
- [11] Few, A. A., The production of lightning-associated infrasonic acoustic sources in thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, vol. 90, 6175-6180, 1985.
- [12] Pasko, V. P., Mechanism of Lightning Associated Infrasonic Pulses from Thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, 114, D08205, doi:10.1029/2008JD011145, 2009.
- [13] Pasko, V. P., Electrostatic mechanism of lightning associated infrasonic pulses from thunderclouds, 9th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics, Dresden, Germany, Sept. 2009.
- [14] Bedard, A. J., Jr., W. A. Lyons, R. A. Armstrong, T. E. Nelson, B. Hill, and S. Gallagher, A search for low-frequency atmospheric acoustic waves associated with sprites, blue jets, elves and storm electrical activity, *Eos Trans. AGU*, 80(46), Fall Meet. Suppl., F227, A51B-18, 1999.
- [15] Liszka, L., On the possible infrasound generation by sprites. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 23, 85–93, 2004.
- [16] Farges, T., E. Blanc, A. Le Pichon, T. Neubert, T. Allin, Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01813, doi:10.1029/2004GL021212, 2005.
- [17] Neubert, T., T. H. Allin, E. Blanc, T. Farges, C. Haldoupis, A. Mika, S. Soula, L. Knutsson, O. van der Velde, R. A. Marshall, U. Inan, G. Satori, J. Bor, A. Hughes, A. Collier, S. Laursen, and I. L. Rasmussen, Co-ordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite2003 campaign, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 67, 807–820, 2005.
- [18] Pasko, V. P., and J. B. Snively, Mechanism of infrasound radiation from sprites, *Eos Trans. AGU*, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract AE23A-0899, 2007.
- [19] Neubert, T., M. Rycroft, T. Farges, E. Blanc, O. Chanrion, E. Arnone, A. Odzimek, N. Arnold, C.-F. Enell, E. Turunen, T. Bosinger, A. Mika, C. Haldoupis, R. J. Steiner, O. van der Velde, S. Soula, P. Berg, F. Boberg, P. Thejll, B. Christiansen, M. Ignaccolo, M. Fullekrug, P. T. Verronen, J. Montanya, N. Crosby (2008), Recent Results from Studies of Electric Discharges in the Mesosphere, *Surv. Geophys.*, 29, 71-137, doi:10.1007/s10712-008-9043-1.
- [20] Cansi, Y., An automatic seismic event processing for detection and location: the PMCC method, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1021–1024, 1995.
- [21] Farges T., and E. Blanc, Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas, accepté au *J. Geophys. Res.*, 2010.
- [22] Arechiga, R. O., Johnson, J. B., Edens, H. E., Rison, W., Thomas, R. J., Eack, K., Eastvedt, E. M., Infrasonic Observations from Triggered Lightning, *Eos Trans. AGU*, 90 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract AE21A-0295, 2009.
- [23] Gainville, Ph. Blanc-Benon, E. Blanc, R. Roche, C. Millet, F. Le Piver, B. Despres and P. F. Piserchia, Misty Picture: A Unique Experiment for the Interpretation of the Infrasound Propagation from Large Explosive Sources, in « *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies* », A. Le Pichon et al. editors, 575-598, Springer, doi: 10.1007/978-1-4020-9508-5, 2010.
- [24] Defer, E., G. Molinié, P. Blanchet, Ph. Lalande, P. Laroche, H-D Betz, A. Bennett, S. Soula, S. Coquillat, J-F Georgis J-P Pinty, Ch. Barthe, and T. Farges, Detection, Analysis and Use of the Lightning Activity during the HYMEX Experiment, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-13406, EGU General Assembly 2009.
- [25] Le Pichon, A., E. Blanc, and D. Drob, Probing high-altitude winds using infrasound, *J. Geophys. Res.*, 110, D20104, doi:10.1029/2005JD006020, 2005.