

## **ED SMAER**

### **Sujet de thèses 2014**

Laboratoire : Institut Jean Le Rond d'Alembert

Etablissement de rattachement : Université Pierre et Marie Curie

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : **F. Coulouvrat** (DR2 CNRS, HDR, section CNRS n°9)

Codirection et section CNU ou CNRS : **R. Marchiano** (PR UPMC, section CNU n° 60)

Titre de la thèse : **Caractérisation de sources acoustiques : application aux éclairs d'orage**

Collaborations dans le cadre de la thèse : CEA-DAM-DIF (Arpajon, 91)

Rattachement au programme :

Hydrological cycle in Mediterranean EXperiment (HYMEX, <http://www.hymex.org/>)

#### **Résumé du sujet :**

Les orages sont présents partout dans le monde (plus de 2000 orages en permanence à la surface de la terre, et plus de 25 éclairs par seconde). Ils sont très fréquemment associés à des phénomènes atmosphériques extrêmes (vents violents, précipitations abondantes, crues subites), notamment dans les régions méditerranéennes (épisodes cévenols). L'étude du cycle hydrologique de l'eau en Méditerranée fait l'objet du projet HyMex. Un programme spécifique sur l'électricité atmosphérique a donné lieu (PEACH-HYMEX) à une campagne de mesures sur le terrain en septembre et octobre 2012 dans la région d'Uzès (Gard) combinant mesures et simulations météorologiques, électromagnétiques et acoustiques. Par ailleurs, un réseau international de capteurs infrasonores (TICE, 60 stations dans le monde entier) est en voie d'achèvement, fournissant des enregistrements en continu notamment sur les éclairs. L'ensemble des données, TICE et PEACH, constitue une base de données unique et très riche pour la compréhension des signaux acoustiques des éclairs et la caractérisation acoustique des éclairs d'orage.

La thèse proposée a pour objectif de caractériser la source à partir de ces bases de données, notamment les enregistrements de la campagne PEACH, et des informations fournies par les codes de propagation développés par l'Institut Jean Le Rond d'Alembert (code FLHOWARD-3D). On essaiera notamment d'identifier clairement les paramètres de la source qui sont caractérisables uniquement avec les mesures infrasonores, et ceux qui permettent d'affiner les résultats obtenus par d'autres méthodes (par exemple électromagnétiques). L'incertitude liée à la propagation et la complexité du milieu de propagation (météorologie, turbulence atmosphérique, topographie) sera évaluée. Le planning prévisionnel du travail est:

1. Traitement de données des mesures éclairs et validation des modèles (sources + propagation).
2. Elaboration d'un modèle de sources (3D champ proche, ou équivalent à grande distance).
3. Propagation en champ proche et à grande distance avec météorologie réaliste. Une analyse statistique pourra également être mise en place pour la validation si nécessaire.
4. Caractérisation de la source en utilisant les résultats des points précédents.

Le travail conjuguera des activités nécessitant le recours à l'analyse statistique de données, au traitement du signal ainsi que l'utilisation de logiciels (simulation de la propagation, de la source, ...).

## Sujet développé

### Contexte :

Les orages sont présents partout dans le monde. Statistiquement il y a plus de 2000 orages en permanence à la surface de la terre, et plus de 25 éclairs par seconde. Les orages sont très fréquemment associés à des phénomènes atmosphériques extrêmes (vents violents, précipitations abondantes, crues subites), et ce notamment dans les régions méditerranéennes (épisodes cévenols par exemple) conduisant régulièrement à des dégâts matériels et humains considérables. L'étude du cycle hydrologique de l'eau en région méditerranéenne fait l'objet du projet HyMex sur une période de 20 ans (<http://www.hymex.org/>). Dans ce cadre, un programme spécifique sur l'électricité atmosphérique a lieu (PEACH-HYMEX) , avec une campagne de mesures sur le terrain en septembre et octobre 2012 dans la région d'Uzès (Gard) combinant mesures et simulations météorologiques, électromagnétiques et acoustiques. En effet, les éclairs émettent des ondes acoustiques (tonnerre) et électromagnétiques (optiques et radios). De nombreuses études ont été menées sur la compréhension du tonnerre entre les années 60 et le milieu des années 80. Elles concernaient principalement : la caractérisation des signaux (amplitude, contenu fréquentiel, ...), la localisation des décharges dans les nuages eux-mêmes alors qu'elles sont invisibles depuis le sol, et la modélisation. Différents modèles de source pour expliquer le tonnerre ont également été proposés depuis 50 ans. A ce jour, ils ne permettent pas d'expliquer l'intensité du signal infrasonore (fréquence du signal inférieure à 20 Hz). Parallèlement à ces études, les progrès dans la mesure électromagnétique ont permis de mettre en place des systèmes de localisation en latitude et longitude des éclairs. Depuis les années 2000, des systèmes plus complexes ("Lightning Mapping Arrays" - LMA) permettent d'avoir une vue 3D des décharges orageuses mais leur couverture spatiale est plus réduite. Ces localisations servent de référence et un réseau LMA a été déployé pour la première fois en Europe lors de la campagne PEACH. En parallèle, un double réseau acoustique a été déployé, de microbaromètres d'une part (infrasons) et de microphones d'autre part (audible).

Par ailleurs, dans le cadre de l'application du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE), l'installation d'un réseau international de capteurs infrasonores (60 stations dans le monde entier) fonctionnant en continu est en voie d'achèvement, fournissant une base de données permanentes notamment sur les sources les plus fréquentes, les éclairs, pourvu qu'elles soient suffisamment proches (quelques dizaines de kilomètres). L'ensemble des enregistrements, TICE et PEACH, constitue une base de données unique et très riche pour la compréhension des signaux acoustiques des éclairs et la caractérisation acoustique des éclairs d'orage.

En parallèle de ces activités, l'Institut Jean Le Rond d'Alembert, Unité Mixte de Recherche 7190 du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie, développe au sein de son équipe MPIA (Modélisation, Propagation et Imagerie Acoustique) des activités de modélisation théorique et numérique de la propagation d'ondes de choc acoustique en environnement atmosphérique. Ces activités ont été initiées dans les années 1995 pour des applications aéronautiques (bang des avions supersoniques, bruit BSN des moteurs), notamment dans le cadre européen (coordination du projet européen SOBER et participation aux projets européens HISAC, ATLLAS et ATLLAS II, contrats avec les sociétés Airbus, Dassault Aviation, et avec la DGA). Elles ont donné lieu à de nombreuses publications dans des RICL (JASA, AIAA J., JFM, Wave Motion, PRL, PRE...). Elles ont été récemment étendues à de nouvelles applications liées à la détection et la caractérisation de sources géophysiques (éclairs – thèse de L. Gallin, météoroïdes – thèse de M. Hennenon...). L'Institut et l'équipe MPIA développent notamment des logiciels de propagation acoustique non linéaire d'ondes de choc en milieu hétérogène avec écoulement (FLHOWARD-3D, thèse en cours de D. Luquet). Dans cet objectif, l'Institut Jean Le Rond d'Alembert et le CEA/DASE sont notamment liés par le Laboratoire de Recherche Conventionné LETMA (convention en cours de signature).

## Objectif de la thèse :

Une précédente thèse (thèse de Louis Gallin) sur le point de s'achever, a permis de procéder à une première exploitation des données de la campagne HyMeX ainsi que de développer un code de propagation 2D (FlHoward2D) adapté aux conditions atmosphériques particulières d'un système orageux (propagation non linéaire d'ondes de choc acoustique, prise en compte de la météorologie avec vent stratifié). Les premières conclusions de ce travail permettent de montrer la très grande complémentarité des mesures réalisées à l'automne 2012. Il a été notamment montré que l'acoustique permet la détection des éclairs jusqu'à des distances de l'ordre de 80 km, la reconstruction 3D des éclairs sol / nuage et nuage / nuage et notamment de l'arc en retour mal détecté par les systèmes électromagnétiques. La base de données HyMeX fournit également les spectres mesurés des signaux, spectres dont il reste à affiner l'analyse par une meilleure modélisation de la source. Il est aussi montré que ce problème était pleinement 3D en ce qui concerne la source. En parallèle, une autre thèse (thèse de David Luquet, en cours, octobre 2012-fin 2015) développe et valide une version 3D parallèle (FlHoward3D) du code de propagation précédemment mentionné. Pour aller plus loin dans la caractérisation acoustique des éclairs d'orage qui sont des sources 3D de géométrie complexe mais désormais caractérisée, l'utilisation de moyens de simulation 3D (FlHoward 3D ou tracé de rayon non linéaire 3D) s'avère donc nécessaire.

La thèse proposée ici aura pour objectif de caractériser la source, et non plus seulement la localiser, à partir des enregistrements et des informations fournies par les codes de propagation. On essaiera notamment d'identifier clairement les paramètres de la source qui sont caractérisables uniquement avec les mesures infrasonores, et ceux qui permettent d'affiner les résultats obtenus par d'autres méthodes (par exemple électromagnétique). L'incertitude liée à la propagation et la complexité du milieu de propagation (météorologie, turbulence atmosphérique, topographie) sera évaluée.

## Déroulement de la thèse :

1. Traitement de données des mesures éclairs dont traitements statistiques, construction d'événements de référence (i.e. explosions mesurées dans le cadre de l'ANR Prolonge) et validation des modèles (sources + propagation).
2. Elaboration d'un modèle de sources 3D champ proche, et d'un modèle de source équivalent pour la propagation à grande distance.
3. Propagation en champ proche et à grande distance à l'aide de moyens de simulation avec météorologie réaliste. Les moyens de simulation utilisés seront ceux existant à l'UPMC (FlHoward3D) et au CEA (tracé de rayon non linéaire 3D), comparaison sur les événements de référence. Une analyse statistique pourra également être mise en place pour la validation si nécessaire.
4. Caractérisation de la source en utilisant les résultats des points précédents.

Le travail conjuguera des activités nécessitant le recours à l'analyse statistique de données, au traitement du signal ainsi que l'utilisation de logiciels (simulation de la propagation, de la source, ...).

**Directeur de thèse et école doctorale :** François Coulouvrat (DR CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190, UPMC) – ED SMAER

**Co-directeur de thèse :** Régis Marchiano (PR UMC, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190, UPMC) – ED SMAER

**Encadrant CEA :** Thomas Farges (Ingénieur de Recherche, CEA-DAM-DIF, DASE)

**Contact :** francois.coulouvrat@upmc.fr

## Publications récentes de l'encadrement sur la thématique :

- L.-J. Gallin, M. Rénier, É. Gaudard, Th. Farges, R. Marchiano, F. Coulouvrat, , "One-way approximation for the simulation of weak shock wave propagation in atmospheric flows", accepté à *J. Acoust. Soc. Am.* , à paraître en mai ou juin 2014
- F. Coulouvrat, "New equations for nonlinear acoustics in a low Mach number and weakly heterogeneous atmosphere", *Wave Motion*, 49, 50-63, 2012
- M. Baudoin, F. Coulouvrat, J.-L. Thomas, "Sound, infrasound, and sonic boom absorption by atmospheric clouds", *J. Acoust. Soc. Am.*, 130, 1142-1153, 2011
- F. Dagrau, M. Rénier, R. Marchiano, F. Coulouvrat, "Acoustical shock wave propagation in a weakly heterogeneous medium : a numerical simulation beyond the parabolic approximation", *J. Acoust. Soc. Am.*, 130, 20-32, 2011
- Th. Farges, E. Blanc, "Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas", *J. Geophys. Res.* 115, A00E31 (2010)
- F. Coulouvrat, "A quasi-analytical shock solution for general nonlinear progressive waves", *Wave Motion*, 46, 97-107, 2009
- A. Loubeau, F. Coulouvrat, "Effects of meteorological variability on sonic boom propagation from hypersonic aircraft", *AIAA J.*, 47(11), 2632-2641, 2009