

Dossier de Candidature CNRS

Chargé de Recherche de 2^{ème} classe

Section du Comité National n° 18
(Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles)

Concours n° 18/04

Kaëlig CASTOR

Sommaire

Curriculum Vitae	2
Formation	2
Recherche	3
Publications	4
Enseignement	5
Autres compétences	6
Descriptif des Activités de Recherche	7
Stage de DEA	7
Thèse	8
Post-Doctorat	9
Ingénieur de Recherche Contractuel	11
Projet de Recherche	13

Kaëlig CASTOR

31 ans (né le 27 nov. 1974 à Provins, 77)

Nationalité Française

Célibataire

Mobilité Internationale

130 Rue Saint Maur, Bat. D, 75011 PARIS

Tel : 06 63 22 41 95

Mél : ckaelig@hotmail.com

URL : <http://kaelig.castor.free.fr>

SITUATION PROFESSIONNELLE ACTUELLE

Depuis mars 2004 **Ingénieur de Recherche Contractuel** au Laboratoire de Détection et de Géophysique, Département Analyse Surveillance Environnement, Commissariat à l'Energie Atomique, Bruyères-le-Châtel, France

FORMATION

1992 : **BAC C**, Lycée Jacques Amyot, Melun, France. *Mention AB.*

1992-1994 **DEUG A (Sciences des Structures de la Matière)**, Université de Paris XI-Orsay, France.

1994-1995 **Licence de Physique et Applications**, Université de Paris XI-Orsay, France. *Mention AB.*

1995-1996 **Maîtrise de Physique et Applications**, Université de Paris XI-Orsay, France. *Mention AB.*

1996-1997 **DEA d'Acoustique Appliquée**, Université du Maine, Le Mans, France. *Mention AB.*

1997-2001 **Thèse de Doctorat, Spécialité : Acoustique Physique**,
Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine,
Soutenue le 19 septembre 2001 au LAUM, UMR-CNRS 6613, Le Mans. *Mention Très honorable.*

Titre : Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives.

Directeurs de thèse : Michel Bruneau, Pr., Philippe Béquin, M&C

Jury :

M. Fitaire	Professeur, LPGP, Université de Paris XI-Orsay (rapporteur)
J. P. Lefebvre	Directeur de Recherche CNRS, LMA, Université d'Aix-Marseille (rapporteur)
Ph. Béquin	Maître de Conférence, LAUM, Université du Maine (co-directeur de thèse)
M. Bruneau	Professeur, LAUM, Université du Maine (directeur de thèse)
Ph. Herzog	Chargé de Recherche CNRS, LMA, Université d'Aix-Marseille
G. Milot	Ingénieur de Recherche, Château du Loir, Audax Industries

2001-2003 **Post-Doctorat**, Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA.

RECHERCHE

- 2004-2006 **Ingénieur de Recherche Contractuel**, Laboratoire de Détection et de Géophysique, Département Analyse Surveillance Environnement, Commissariat à l'Energie Atomique, Bruyères-le-Châtel, France.
- Sujet #1 : **Modélisation de la propagation acoustique tridimensionnelle dans un guide d'onde océanique réaliste par un code aux équations paraboliques sur ordinateur multiprocesseur** (Contrat DGA).
- Mots clés : équation parabolique tridimensionnelle grand-angle (3DWAPE), simulations numériques, hydroacoustique, réfraction horizontale, bases de données océanographiques à l'échelle globale, réseau du Système de Surveillance International (SSI), calculs parallèles, librairie MPI.
- Collaborations : Frédéric Sturm, MdC, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, Ecole Centrale de Lyon
- Sujet #2 : **Modélisation de la propagation acoustique non linéaire dans l'atmosphère.**
- Mots clés : Equation Parabolique Non linéaire (NPE), simulations numériques, onde de choc, infrasons, propagation longue-distance.
- Collaborations : François Coulouvrat, DR, Régis Marchiano, MdC, LMM, Université Paris 6, Groupe MOPA (**MO**délisation de la **PRO**pagation **ACO**ustique) regroupant le CEA, le LMFA - Centrale Lyon, et le Laboratoire de Modélisation en Mécanique UMR 7607 Université Paris 6.
- 2001-2003 **Post-Doctorat**, Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, UCSD, USA.
- Sujet : **Etude de la signature non linéaire à très longue distance de la propagation acoustique d'une source de forte amplitude dans un guide d'onde océanique.** Contrat *Office Naval Research - Defense Threat Reduction Agency (DTRA)* dans le cadre du respect du traité international d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE).
- Mots clés : Equation Parabolique Non linéaire (NPE), simulations numériques, onde de choc, interaction paramétrique, harmoniques, dispersion modale.
- Collaborations : B. Ed. McDonald, US Naval Research Laboratory, ONR, Washington DC, USA
- 1997-2001 **Doctorat d'Acoustique Physique**, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Groupe Transducteurs, Le Mans.
- Sujet : **Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives.**
- Mots clés : sources acoustiques, gaz ionisé, décharges couronnes, rendement électroacoustique, distorsion, interactions électriques, vent électrique.
- 1997
(4 mois) **Stage de DEA d'Acoustique**, Laboratoire Onde et Acoustique de l'Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de Paris, France.
- Sujet : **Propagation des ondes acoustiques dans les milieux multi-échelles, simulations et validations expérimentales.**
- Mots clés : propagation acoustique, ondes guidées, structure aléatoire, structure fractale, impédance d'entrée, filtre acoustique.
- 1996
(3 mois) **Stage de Maîtrise**, Laboratoire d'Acoustique du Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France.
- Sujet : **Modélisation et conception d'une suspension pour un microphone de prise de son cinéma.**
- Mots clés : vibrations, formalisme Lagrangien, transmission solidienne, simulations, mesures de transmissibilité.
- 1995
(1 mois) **Stage de Licence**, Laboratoire de Physique des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
- Sujet : **Recherche d'antimatière dans le rayonnement cosmique.**

Articles de revues internationales à comité de lecture :

- 1- Gibiat V., Barjau A., **Castor K.**, Bertaud du Chazaud E., *Acoustical propagation in a prefractal wave-guide*. Physical Review E, vol. 67, 066609 (2003).
- 2- Bequin Ph., **Castor K.**, Scholten J., *Electric wind characterisation in negative point-to-plane corona discharges in air*. Eur. Phys. J. - AP **22**, 41-49 (2003).
- 3- **Castor K.**, Gerstoft P., Roux Ph., McDonald B. E., Kuperman W. A., *Long Range Propagation of Finite Amplitude Acoustic Waves in an Ocean Waveguide*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 116, pp. 2004-2010 (2004).
- 4- **Castor K.**, Béquin Ph., Herzog Ph., Montembault V., *Modeling of a Corona Loudspeaker*. (en cours de soumission au J. Audio Eng. Soc.)
- 5- **Castor K.**, Sturm F., *Analysis of 3-D Acoustical Effects in a Realistic Oceanic Environment using a Parallel Parabolic Equation Algorithm*. (en cours de soumission au J. Comp. Acoust.)

Conférences internationales avec comité de lecture et publication des actes :

- 1- **Castor K.**, Montembault V., Béquin Ph., *Ionic loudspeaker using negatives point-plane discharges*. International Student Conference on Electrical Engineering, Prague, République Tchèque, mai 1998.
- 2- **Castor K.**, Béquin Ph., *Acoustic Behaviour of the Corona Loudspeaker with High Electric Modulations*. 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italie, septembre 2001.
- 3- **Castor K.**, McDonald B. E., Kuperman W. A., *Equations of nonlinear acoustics and weak shock propagation*, 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscow, Russia, août 2002.
- 4- **Castor K.**, Gerstoft P., Kuperman W. A., McDonald B. E., Gerald L. D'Spain, *Nonlinear effects in long range propagation*, 24th Seismic Research Review, Jacksonville, USA, sept. 2002.
- 5- **Castor K.**, Sturm F., Piserchia P. F., *Analysis of 3-D Acoustical Effects in a Realistic Oceanic Environment*, Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results Int. Conf., Heraklion, Crete, Greece, juin 2005.

Conférences nationales avec comité de lecture et publication des actes :

- 1- **Castor K.**, Béquin Ph., *Rendement d'un haut-parleur à décharges corona négatives*. Congrès Français d'Acoustique, Lausanne, Suisse, septembre 2000.
- 2- Béquin Ph., **Castor K.**, *Etude du comportement non linéaire d'un haut-parleur à gaz ionisé*, 8^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Tours, France, Avril 2006.

Conférences internationales sans acte :

- 1- **Castor K.**, Gerstoft P., Roux Ph., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Long range nonlinear propagation in an ocean acoustic waveguide*, 144th Meeting of the Acoustical Society of America - 1st Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics, Cancun, Mexico, nov. 2002.
- 2- **Castor K.**, Roux Ph., Gerstoft P., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Nonlinear modes interaction in an acoustics waveguide*, 146th Meeting of the Acoustical Society of America, Austin, USA, nov. 2003.
- 3- **Castor K.**, Gerstoft P., Roux Ph., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Long range propagation of finite amplitude acoustic waves in an ocean waveguide*, T-phase Workshop: "Seismo-Acoustic Applications in Marine Geology and Geophysics", Woods Hole Oceanographic Institution, MA, USA, mars 2004.
- 4- **Castor K.**, Sturm F., Piserchia P. F., *Acoustical propagation modelling using the three-dimensional parabolic equation based code 3DWAPE within a multiprocessing environment*, 148th Meeting of the Acoustical Society of America, San Diego, USA, nov. 2004.
- 5- **Castor K.**, Sturm F., Piserchia P. F., *Development of numerical acoustical tools for hydroacoustic monitoring*, Comprehensive nuclear-Test-Ban Treaty Organisation Hydroacoustics Workshop, Victoria, British Columbia, Canada, mai 2005.

ENSEIGNEMENT

2000-2001 : 1/2 poste d'Attaché Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche en 60^{ème} section (mécanique), 90h équivalent TD, Université du Maine, Le Mans, France.

1997-2000 : Poste de **Moniteur**, 192h équivalent TD, Université du Maine, Le Mans, France.

Nombre total d'heures d'enseignement équivalent TD : 282

Matière	Type	Niveau	Années	Nb.d'heures
Mécanique du solide	TD	Deust-VAS ¹ 2ème année	2000-01	20h
			1999-00	20h
Acoustique Physique	TP	Deust-VAS 2ème année	2000-01	20h
			1999-00	20h
			1998-99	20h
ElectroAcoustique, Electronique	TD	Deust-VAS 2ème année	1997-98	20h
			2000-01	21h
			1999-00	15h
ElectroAcoustique, Electronique	TP	Deust-VAS 2ème année	1998-99	15h
			1997-98	15h
			2000-01	48h
Acoustique Physique	TD	Deust-VAS 1ère année	1999-00	15h
Acoustique	TP	DEA Acoustique	1998-99	15h
			1997-98	12h
Soutiens (traitement du signal, électromagnétisme, mathématiques, électronique analogique, électroacoustique)	TD	Deust-VAS 1ère année	1998-99	12h
			1997-98	4h
Vibrations	TD	Deust-VAS 1ère année	1998-99	24h
Vibrations	TP	Deust-VAS 2ème année	1997-98	8h
Vibrations	TP	Deust-VAS 2ème année	1997-98	12h

¹Deust VAS : Deust Vibrations-Acoustique-Signal, Université du Maine.

Note : Un descriptif détaillé des enseignements est disponible à l'adresse suivante : <http://kaelig.castor.free.fr/enseig.htm>

AUTRES COMPETENCES

Langues

Anglais : lu, parlé, écrit.

Espagnol : lu, parlé, écrit.

Informatique

Langages de Programmation :

C, C++, Fortran.

Logiciels et codes de calcul :

- Math et Traitement du Signal Matlab, Mapple, Mathematica, Paw.
- Interfaçage d'appareils de mesure HP-Vee, Labview
- Modélisation de la propagation acoustique ONR Ocean Acoustic Library (OALIB) (Tracé de Rayons, Sommutation de Modes Propres, Equation Parabolique, Intégration du nombre d'onde), Nonlinear Parabolic Equation (NPE, KZK), 3-D Parabolic Equation (3DWAPE)

Environnements :

Linux, Unix, Windows, MS-DOS

DIVERS

Musique : Batterie jazz depuis 1987. Organisations de concerts avec plusieurs groupes.
Basse électrique, et claviers. Musique Assistée par Ordinateur, Composition.

REFERENCES

Bruno Feignier , Directeur LDG, Vice Président EMSC Laboratoire de Détection et de Géophysique, LDG/DASE/CEA/DAM, BP 12 91680 Bruyères-le-Châtel, France, Tel : 01 69 26 61 94, bruno.feignier@cea.fr	Pierre Franck Piserchia , Ingénieur Chercheur CEA, Laboratoire de Détection et de Géophysique, LDG/DASE/CEA/DAM, BP 12 91680 Bruyères-le-Châtel, France, Tel : 01 69 26 62 78, piserchia@dase.bruyeres.cea.fr
François Coulouvrat , DR CNRS, Laboratoire de Modélisation en Mécanique (UMR CNRS 7607), Université Pierre et Marie Curie, bât 55/65 - pièce 509A, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05 Tel : 01 44 27 51 46, coulouvr@ccr.jussieu.fr	Frédéric Sturm , MdC, Laboratoire de Mécaniques des Fluides et d'Acoustique, Ecole Centrale de Lyon (UMR-CNRS 5509), 36 Av Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex France, Tel : 04 72 18 60 02, frederic.sturm@ec-lyon.fr
W. A. Kuperman , Président de Acoustical Soc. Am., Directeur MPL Marine Physical Laboratory, Scripps Inst. Oceanography, UCSD 9500 Gilman Dr, La Jolla, CA 92093-0213, USA Tel : 858 534 1803, wak@mpl.ucsd.edu	Peter Gerstoft , Chercheur au Scripps Institution of Oceanography Marine Physical Laboratory, University of California, San Diego 9500 Gilman Dr, La Jolla, CA 92093-0238, USA Tel : 858 534 7768, gerstoft@ucsd.edu
B. E. McDonald , Chercheur au US Naval Research Laboratory, Office Naval Research, code 7145, Washington DC 20375, USA, Tel : 202 404 8087, mcdonald@sonr.nrl.navy.mil	Philippe Roux , CR CNRS, LGIT- Maison des Géosciences, 1381 rue de la Piscine, BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9, Tel : 04 76 82 80 38, Philippe.Roux@obs.ujf-grenoble.fr
Michel Bruneau , Professeur, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS Cedex 9 Tel : 02 43 83 32 59, michel.bruneau@univ-lemans.fr	Philippe Béquin , MdC, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS Cedex 9 Tel : 02 43 83 32 78, philippe.bequin@univ-lemans.fr
Vincent Gibiat , Professeur, Université Paul Sabatier, LAMI 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 4 Tel : 05 61.55.81.69, gibiat@cict.fr	

DESCRIPTIF DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Stage de DEA

Propagation acoustique dans les milieux multi-échelles.

1997, 4 mois, Laboratoire Ondes et Acoustique, ESPCI, Paris. Directeur de stage : V. Gibiat

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche d'un modèle qui puisse rendre compte de la propagation des ondes acoustiques dans des milieux d'extrême porosité, de structure complexe et similaire sur plusieurs échelles d'observation (structures dites "hiérarchiques", "self-similaires" ou "fractales"), et de tortuosité très élevée : les aérogels de silice. L'objet de ce travail est de déterminer les effets d'une structure hiérarchique sur les caractéristiques d'un filtre acoustique. En particulier, il s'agit d'étudier la transmission des ondes acoustiques à travers un réseau unidimensionnel de tuyaux sonores de sections différentes et organisées de manière aléatoire ou "self-similaire" sur plusieurs échelles.

Un exemple typique de structure hiérarchique est l'ensemble de Cantor : partant du segment unité, celui-ci est divisé en trois, le tiers central est supprimé, et cette démarche est répétée pour les segments restants. En itérant le processus à l'infini, un ensemble dit "poussière de Cantor", de dimension topologique non entière, est obtenu.

La propagation acoustique dans une structure hiérarchique unidimensionnelle de type Cantor est modélisée dans le domaine temporel. Puis une simulation numérique est effectuée et optimisée à l'aide des résultats de mesures de l'impédance d'entrée de cette structure pour plusieurs conditions de terminaisons et d'ordres de fractalité. Les résultats expérimentaux et numériques présentent un accord satisfaisant jusqu'à l'ordre 5. Les structures hiérarchiques et aléatoires sont comparées ce qui permet de montrer que l'aspect fractal de la structure joue remarquablement un rôle de filtre acoustique [1].

[1] Gibiat V., Barjau A., Castor K., Bertaud du Chazaud E., *Acoustical propagation in a prefractal wave-guide*. Physical Review E, vol. 67, 066609 (2003).

Mots clés : propagation acoustique, ondes guidées, structure fractale, impédance d'entrée, filtre acoustique, structure aléatoire.

Thèse

Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives.

1997-2001, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans. Directeurs : M. Bruneau, Ph. Béquin

Contexte :

Un haut-parleur ionique à décharges couronnes se compose de deux électrodes de rayons de courbure différents (e.g. pointe-plan) aux bornes desquelles est appliquée une haute-tension. Le champ électrique résultant est suffisamment élevé pour que soit créé et entretenu un "plasma froid", gaz dans lequel coexistent des particules chargées et neutres. La modulation de ce champ électrique, qui régit directement l'action des particules chargées (électrons et ions) sur les molécules neutres de l'air, est à l'origine d'une onde acoustique.

Au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine deux thèses précédentes ont été soutenues sur la transduction ionique : celle de Ph. Béquin a principalement révélé la coexistence de deux types de sources acoustiques (force et chaleur) se partageant l'espace interélectrode, et celle de V. Montembault a porté sur la mise au point d'une instrumentation spécifique pour confirmer ces résultats théoriques.

Mon travail de thèse s'est inscrit dans la continuité de ces travaux. Son objectif principal a été de poursuivre l'étude du haut-parleur ionique tant d'un point de vue théorique qu'expérimental, afin d'en améliorer le rendement et les niveaux sonores. En outre, l'étude a porté sur les phénomènes électriques et hydrodynamiques qui peuvent nuire à l'émission acoustique des décharges électriques.

Enfin le contenu de cette thèse fait l'objet, pour le premier semestre 2006, de la soumission d'un article prévu pour la revue internationale J. Audio Engineering Soc., ainsi que d'une conférence nationale avec acte :

- Castor K., Béquin Ph., Herzog Ph., Montembault V., *Modeling of a Corona Loudspeaker*. (en cours de soumission au J. Audio Eng. Soc.)
- Béquin Ph., Castor K., *Etude du comportement non linéaire d'un haut-parleur à gaz ionisé*, 8^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Tours, France, Avril 2006.

Résumé :

L'étude porte sur les caractéristiques électriques et acoustiques des haut-parleurs ioniques de configuration d'électrodes pointe-plan dans l'air, où le gaz ionisé est obtenu par des décharges électriques de type "couronnes négatives". L'objet principal de ce travail est la recherche de configurations électriques et géométriques optimales en terme de rendement électroacoustique et de niveau sonore.

Le champ de pression généré par le haut-parleur est écrit comme une somme de deux termes, l'un monopolaire, l'autre dipolaire, respectivement relatifs aux transferts thermiques et de quantité de mouvement entre particules chargées et neutres du gaz ionisé. Le volume des décharges, supposé cylindrique jusqu'ici, est considéré tronconique ce qui affine, en basses fréquences, l'ajustement du modèle sur les résultats expérimentaux.

Un modèle du bilan énergétique du transducteur et une étude expérimentale, pour divers matériaux de pointe et différentes configurations électriques et géométriques, permettent de proposer une configuration du système qui optimise son rendement électroacoustique.

Afin d'augmenter le niveau sonore généré, une première méthode consiste à étudier le haut-parleur soumis à de forts taux de modulation en courant. A cette fin, un nouveau dispositif expérimental est développé. Les résultats de mesures microphoniques et de mesures de vitesses particulières par Anémométrie Laser-Doppler, corroborés par un modèle de la pression acoustique (fondamental et harmoniques) montrent un comportement non linéaire de la source thermique. Une deuxième méthode pour accroître le niveau sonore est d'augmenter le volume de gaz ionisé en multipliant le nombre de pointes. Les performances acoustiques d'un système multipointe sont restreintes par des interactions électriques entre les décharges issues de chaque pointe. Une étude théorique permet d'appréhender les phénomènes mis en jeu et d'estimer la distance optimale de la séparation entre pointes.

Mots clés : sources acoustiques, haut-parleur, gaz ionisé, décharges couronnes, rendement électroacoustique, distorsion, interactions électriques, vent électrique.

Post-Doctorat

Propagation Acoustique Non Linéaire dans un Guide d'Onde Océanique.

Dec. 2001- dec. 2003,

Marine Physical Laboratory,

Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA.

Sous la direction de W. A. Kuperman

Contexte :

Ce travail, financé par un contrat ONR/DTRA (*Office Naval Research/Defense Threat Reduction Agency*), s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche international visant à mettre au point des techniques de détection et d'identification des ondes acoustiques à très basses fréquences d'origine naturelle (séismes, volcans, mammifères marins, icebergs, ...) ou artificielle (explosions chimiques et nucléaires) se propageant dans les océans du globe sur de très longues distances (de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres), afin de vérifier le respect du CTBT (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*), traité d'interdiction complète des essais nucléaires.

Une explosion sous-marine génère une onde acoustique de forte amplitude qui se propage en régime non linéaire. En d'autres termes, à mesure que cette onde se propage, en plus des phénomènes physiques linéaires tels que la réfraction et la diffraction, l'onde acoustique subit une déformation de sa forme temporelle.

L'objet de ce travail est de développer des techniques numériques utilisant le modèle NPE [1] dans le cadre de l'étude de la propagation acoustique non linéaire sur de longues distances dans un guide d'onde océanique.

Résumé :

L'objectif de cette étude est de déterminer la signature acoustique à longue distance (de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres) d'un signal de forte amplitude tel qu'une explosion nucléaire dans différents types d'environnements océaniques. Un code basé sur une Equation Parabolique Non linéaire (NPE [1]) permet le calcul de la propagation d'une onde de compression de forte amplitude. Le NPE a pour avantage de présenter des termes séparés pour les processus physiques suivants : réfraction, déformée du signal temporel due à la non linéarité du milieu, pertes géométriques et diffraction [2]. Le code NPE fonctionne dans le domaine temporel ; les effets non linéaires et/ou aux effets linéaires larges-bandes sont donc inclus dans les calculs de propagation sans décomposition de Fourier. Le champ est calculé dans une fenêtre spatiale à chaque incrément temporel (Fig. 1).

Les résultats numériques [3, 4] montrent que dans le cas d'une eau peu profonde, les pertes géométriques sont plus faibles (cylindriques en $1/r$) qu'en eau profonde (sphériques en $1/r$), créant ainsi des effets non linéaires plus importants. D'une part, les non linéarités induisent de la distorsion harmonique ($1f, 2f, 3f, \dots$) et des effets paramétriques ($f_1 \pm f_2$) qui se manifestent par une modification considérable du spectre au cours de la propagation. D'autre part, ces deux phénomènes entrent en compétition avec l'absorption créée par les non linéarités. En effet, pour de fortes explosions, une absorption d'énergie importante se produit rapidement due à la formation d'une onde de choc. L'absorption agissant en priorité sur les hautes fréquences, une prédominance de la composante paramétrique basse fréquence par rapport à la génération d'harmoniques est observée.

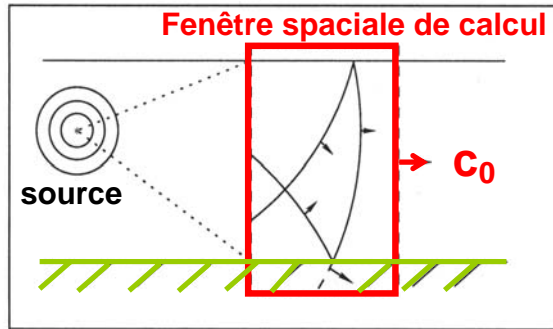


Figure 1 : Représentation de la fenêtre spatiale, se déplaçant à c_0 la vitesse moyenne de propagation du son, dans laquelle le champ de pression est calculé à chaque instant par le code NPE.

Au delà d'une certaine distance de propagation, l'amplitude du champ devient suffisamment faible pour pouvoir coupler le code NPE avec un code linéaire basé sur la décomposition du champ sur les modes propres du guide d'ondes (Kraken Normal Modes code [5]). Les non linéarités du milieu induisent l'excitation d'un plus grand nombre de modes et une redistribution de l'énergie de manière plus homogène sur ces modes. Les non linéarités peuvent conduire à des résultats similaires à ceux obtenus pour la propagation acoustique à longue distance dans un milieu inhomogène : une tendance vers une équipartition modale [6]. En outre, les processus non linéaires de conversion paramétrique des modes interagissant avec le fond vers des modes d'ordre faible piégés dans le canal SOFAR suggèrent un mécanisme potentiel pour la génération d'ondes T [7, 8].

- [1] B. E. McDonald, W. A. Kuperman, *Time domain formation for pulse propagation including nonlinear behaviour at a caustic*. J. Acoust. Soc. Am. 81 (5), May 1987.
- [2] Castor K., McDonald B. E., Kuperman W. A., *Equations of nonlinear acoustics and weak shock propagation*. 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscou, Russie, août 2002.
- [3] Castor K., Gerstoft P., Kuperman W. A., McDonald B. E., Gerald L. D'Spain, *Nonlinear effects in long range propagation*. 24th Seismic Research Review, Jacksonville, USA, septembre 2002.
- [4] Castor K., Gerstoft P., Roux Ph., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Long range nonlinear propagation in an ocean acoustic waveguide*, J. Acoust. Soc. Am. **112**, 2232 (2002)
- [5] Porter, M., *The KRAKEN normal mode program*, SACLANTCEN SM-245, LaSpezia, Italy, 1991.
- [6] Castor K., Roux Ph., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Nonlinear modes interaction in an acoustic waveguide*, J. Acoust. Soc. Am. **114**, 2429 (2003).
- [7] Castor K., Gerstoft P., Roux Ph., McDonald B. E., Kuperman W. A., *Long Range Propagation of Finite Amplitude Acoustic Waves in an Ocean Waveguide*. J. Acoust. Soc. Am. **116**, 2004 (2004).
- [8] Castor K., Gerstoft P., Roux Ph., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Long range propagation of finite amplitude acoustic waves in an ocean waveguide*, T-phase Workshop: "Seismo-Acoustic Applications in Marine Geology and Geophysics", Woods Hole Oceanographic Institution, MA, USA, mars 2004.

Mots clés : Equation Parabolique Non linéaire (NPE), simulations numériques, onde de choc, interaction paramétrique, harmoniques, dispersion modale.

Ingénieur de Recherche Contractuel

Modélisation de la propagation acoustique tridimensionnelle dans un guide d'onde océanique réaliste par un code aux équations paraboliques sur ordinateur multiprocesseur

Mars 2004 – mars 2006,

Laboratoire de Détection et de Géophysique, Département Analyse Surveillance Environnement,

Direction de Applications Militaires, Commissariat à l'Énergie Atomique, Bruyères-le-Châtel.

Sous la direction de B. Feignier

Afin de s'assurer du respect de l'application du traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le réseau du Système de Surveillance International (SSI) va disposer, entre autres, d'un réseau mondial de 60 stations de mesure des infrasons et de 11 stations hydroacoustiques. L'atmosphère et l'océan sont des guides d'ondes naturels qui permettent la propagation des ondes acoustiques sur de très longues distances avec de faibles atténuations. Les fréquences des signaux étudiés sont généralement de l'ordre du Hertz et les distances de propagation peuvent aller jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. Le CEA/DIF/DASE est chargé notamment de développer des modèles de simulations numériques en acoustique aérienne et sous-marine, ainsi que des algorithmes de traitement de signal pour contribuer à l'interprétation des signaux enregistrés sur ses stations ou celles du SSI. Les outils de simulation doivent pouvoir être utilisés dans un contexte opérationnel d'exploitation des données, mais également pour réaliser des expertises sur des événements particuliers.

L'océan et l'atmosphère présentent des différences conséquentes concernant des paramètres qui conditionnent de manière significative la propagation acoustique comme par exemple les profils de densité du milieu ou bien de vitesse du son. Cependant, il est en général possible d'appliquer des méthodes communes pour modéliser la propagation acoustique dans ces deux milieux. Ces méthodes sont classiquement utilisées pour simuler de manière générale un problème de propagation acoustique dans un guide d'onde. Les modèles de simulation de la propagation acoustique en développement au CEA sont basés sur différentes techniques classiques telles que le tracé de rayons, la sommation de modes propres, l'équation d'Euler, et l'équation parabolique. Toutes ces méthodes présentent leurs avantages et leurs inconvénients en terme de limitations physiques, de temps CPU et de précision de calcul, en fonction des conditions de la source, et de l'environnement de propagation.

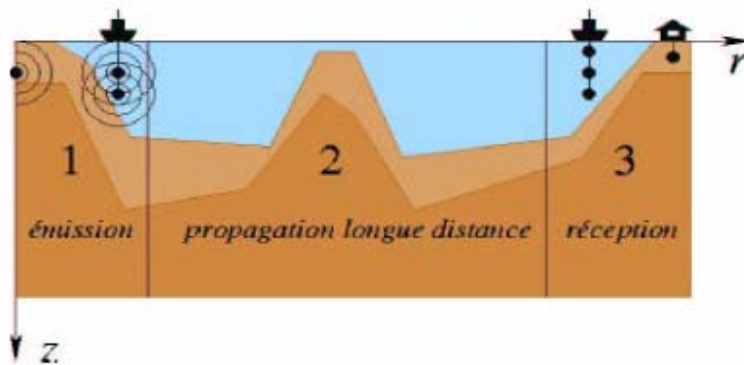


Figure 1 : Exemple de représentation schématique de la séparation des zones de calcul pour un modèle hybride 3-D/2-D couplant deux codes paraboliques. Les zones 1 et 3, de l'ordre d'une cinquantaine de kilomètres de distance, peuvent être traitées avec le code 3DWAPE, tandis que dans la zone 2, le champ peut être calculé avec le code RAMS en 2-D élastique, sur plusieurs milliers de kilomètres.

Pour pouvoir traiter un grand nombre de scénarii de propagation différents mais aussi pour s'assurer de la pertinence des calculs en comparant les résultats de codes basés sur différentes approches, il est nécessaire de disposer de plusieurs modèles. Le principal travail que j'ai réalisé au CEA a porté sur le code 3DWAPE (*3-Dimensional Wide Angle Parabolic Equation*) développé par F. Sturm [1], basé sur la résolution d'une équation parabolique tridimensionnelle en coordonnées cylindriques. L'objectif a été de rendre opérationnelle son utilisation pour les besoins spécifiques du CEA. Cela a consisté à réduire les temps de calcul en parallélisant le code et à automatiser son utilisation pour des applications en environnement océanique réel. Dans le contexte du CTBT, des simulations basées sur l'approche parabolique avaient déjà été réalisées [2] pour la propagation de signaux impulsionnels à très basses fréquences sur de très longues distances de plusieurs milliers de kilomètres. En utilisant les modèles paraboliques disponibles, l'objectif a été d'améliorer les simulations numériques pour trouver un meilleur accord avec les signaux d'explosions enregistrés lors des expériences en mer calibrées telles que l'expérience de Melville [3]. Bien qu'il

ne soit pas encore envisageable de simuler la propagation acoustique en 3-D sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres, la Figure 1 montre qu'un modèle parabolique hybride 3-D/2-D couplant un modèle 3-D à un modèle 2-D peut être développé aisément pour prendre en compte les effets 3-D dont l'influence est majoritairement localisée dans les zones proches de la source et du récepteur en cas de variations bathymétriques importantes. Le modèle parabolique 2-D élastique RAMS [2] développé dans le domaine temporel peut par exemple être utilisé dans la région intermédiaire entre la source et le récepteur pour la propagation longue-distance (Fig. 1).

Pour des environnements océaniques présentant, en particulier, des variations bathymétriques et des gradients horizontaux de vitesses du son, il a été démontré expérimentalement et numériquement que le couplage azimutal, c'est à dire l'échange d'énergie acoustique entre différents plans verticaux passant par le point source, peut être significatif dans la propagation acoustique. Il est donc nécessaire de disposer d'un modèle complètement tridimensionnel pour tenir compte de la réfraction horizontale. Dans sa conception, 3DWAPE est un modèle tridimensionnel développé pour l'acoustique sous-marine. Il permet de traiter des problèmes 3-D, N×2-D (en négligeant le couplage entre les plans azimutaux), ou tout simplement 2-D. L'inconvénient principal d'un code 3-D est qu'il est très coûteux en temps de calcul. Pour diminuer les temps CPU et augmenter la place mémoire requise par les méthodes numériques, la parallélisation du code s'est avérée indispensable.

Le CEA/DIF/DASE a donc décidé d'adapter et développer ce modèle à l'environnement multiprocesseur de ses supercalculateurs. La parallélisation du code, d'une part, et l'implémentation de modèles géophysiques, d'autre part, permettent désormais de traiter des problèmes réalistes de propagation acoustique pour lesquels peuvent être considérés :

- tous les paramètres de l'environnement 3-D, notamment les profils de vitesse et la bathymétrie issus de bases de données. Dans ce cadre, il est nécessaire d'effectuer un maillage suffisamment fin du milieu pour les calculs de propagation de sources impulsionnelles à spectre large-bande,
- des distances de propagation plus importantes, qui impliquent une prise en compte d'un grand nombre d'angles azimutaux dans les calculs 3-D.

La stratégie de parallélisation choisie [4] est une méthode bien appropriée, basée sur deux niveaux de parallélisation. En premier lieu, le calcul d'un signal large-bande est accéléré de manière efficace en distribuant indépendamment sur différents processeurs les calculs à chaque fréquence. Conformément aux prévisions, de bonnes performances de calculs sont obtenues car seules quelques communications entre les processeurs sont nécessaires dans ce cas. Le second niveau de parallélisation est dédié à l'accélération des calculs à une seule fréquence. La distribution sur différents processeurs de toutes les inversions de matrices requises fournit aussi de bons résultats bien que les communications ne soient plus négligeables. Désormais, il est possible d'utiliser la version parallélisée du code 3DWAPE pour effectuer des simulations numériques réalistes utilisant les modèles géophysiques classiques pour la bathymétrie et les profils de vitesse à l'échelle globale. Des temps CPU raisonnables sont obtenus [5]. Les calculs parallèles permettent de repousser les limites liées aux temps CPU, et rendent possible l'analyse des effets acoustiques 3-D pour différentes configurations de propagation mettant en jeu un spectre de source contenant un grand nombre de fréquences discrètes, et/ou des distances de propagation plus élevées, et/ou des fréquences plus élevées. Il est désormais envisageable d'étudier les effets 3-D associés :

- aux interactions avec la bathymétrie (talus océaniques, monts sous-marins, ...) notamment à proximité des Stations du Système International,
- à la diffraction d'un fond marin rugueux,
- à la réfraction latérale due aux variations de température des océans à des mélanges d'eaux de différentes températures qui peuvent provoquer d'importants gradients horizontaux de vitesse du son (front du courant circumpolaire au Nord de la station de Crozet, langues d'eau, ...),
- aux ondes internes.

[1] F. Sturm, J. A. Fawcett, *On the use of higher-order azimuthal schemes in 3-D PE modelling*, J. Acoust. Soc. Am. 113 (2003) 3134-3145.

[2] F. Sturm, P. F. Piserchia, *Long-range propagation of broadband sound pulses using a seismo-acoustic PE model*, 7th European Conf. on Underwater Acoustics, Delft, 5-8 July, 2004.

[3] D. Blackman, J. Mercer, R. Andrew, C. de Groot-Hedlin, and P. Harben, *Indian Ocean Calibration Tests: Cape Town-Cocos Keeling 2003*, 25th Seismic Research Review - Trends in Nuclear Explosion Monitoring (2003).

[4] Castor K., Sturm F., Piserchia P.-F., *Acoustical propagation modeling using the three-dimensional parabolic equation based code 3DWAPE within a multiprocessing environment*, J. Acoust. Soc. Am. **116**, 2549 (2004)

[5] Castor K., Sturm F., Piserchia P. F., *Analysis of 3-D Acoustical Effects in a Realistic Oceanic Environment*, Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results Int. Conf., Heraklion, Crete, Greece, juin 2005.

Projet de Recherche

Concours CNRS-CR2 n° 18/04

Modélisation des Mécanismes de Conversion Sismo-Acoustique et de la Propagation Acoustique Sous-Marine Longue-Distance dans le cadre de l'Etude de la Sismicité Océanique par Mesures Hydroacoustiques.

Kaëlig CASTOR

Résumé du Projet de Recherche

Deux équipes françaises, l'UMR 6538 " Domaines Océaniques " à Brest et l'UMR 7097, Laboratoire de Géosciences Marine de l'IPG à Paris, collaborent pour développer et mettre en oeuvre un parc français d'hydrophones autonomes, destiné à l'observation à long terme de la sismicité des domaines océaniques. Les caractéristiques des séismes, obtenus par l'observation des ondes T, fournissent des informations importantes pour la compréhension des processus physiques actifs dans la croûte et la lithosphère océaniques. Les ondes T se propagent sur de longues distances dans les océans et relativement peu d'hydrophones (6 espacés de 2000km environ) sont nécessaires pour identifier et localiser avec précision les "épïcêtres" des séismes sur des régions océaniques très étendues et éloignées des réseaux mondiaux (tel que l'Atlantique Nord). L'intérêt de ces instruments réside également dans leur longue autonomie (2 ans), et leur sensibilité aux séismes de faible magnitude ($M > 3$). Cette technologie est robuste et sa mise en oeuvre est peu onéreuse. Les projets de recherche en cours concernent la surveillance acoustique long terme de la micro-sismicité associée à la dorsale Atlantique autour des Açores (chantier MoMAR), aux trois dorsales Indiennes, à la déformation intra-océanique intense de l'océan Indien, à la subduction Java-Sumatra, et à la subduction des Antilles (en complément des stations hydroacoustiques permanentes du CTBTO : 3 dans l'océan Indien et 2 aux Antilles). Jusqu'à présent, les travaux réalisés ont permis de maîtriser l'acquisition et le traitement des données hydroacoustiques. Cependant, les mécanismes de la création des ondes T (mécanismes de rupture à la source et de conversion sismo-acoustique) demeurent mal connus.

Mon projet de recherche vise à modéliser la conversion sismo-acoustique et la propagation acoustique longue- distance. La compréhension de tous les phénomènes physiques qui altèrent la forme des signaux au cours de la propagation permettra d'améliorer les localisations, ainsi que de remonter aux mécanismes des ruptures, à leur magnitude, et à leur profondeur. Pour réaliser ce projet, j'adapterai des modèles existants pour simuler la propagation d'une source volumique polarisée disposée dans un fluide poro-élastique et la conversion à l'interface croûte/océan. L'utilisation d'un modèle hybride permettra ensuite de propager les signaux acoustiques obtenus sur de très longues distances de propagation (de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres). Ces travaux de modélisation pourront se faire dans le cadre d'un prolongement de collaboration avec F. Sturm de l'Ecole Centrale de Lyon, et de P. Gerstoft du MPL à Scripps. En outre, avec le soutien du LDG/CEA, je poursuivrai des recherches concernant l'amélioration des méthodes de traitement des données pour la localisation, la discrimination et la classification d'évènements.

INTRODUCTION

Les séismes se produisant dans les domaines océaniques, les explosions sous-marines ou souterraines situées proches d'une mer ou d'un océan génèrent des ondes hydroacoustiques. La Figure 1 distingue deux types d'ondes : les ondes H dont la source est dans l'eau, et les ondes T dont l'origine est sous-terrainne. Se propageant dans l'océan, parfois sur des milliers de

kilomètres, les ondes hydroacoustiques sont enregistrées par des récepteurs immergés (hydrophones) ou des stations sismiques côtières (stations Ondes T).

Ce projet s'inscrit dans un programme de recherche mené par l'UMR 6538 « Domaines Océaniques » à Brest, en collaboration avec le Laboratoire de Géosciences Marine de l'IGP à Paris, visant à développer et mettre en œuvre un parc français d'hydrophones autonomes, destiné à l'observation à long terme de la sismicité des domaines océaniques. L'observation et la localisation des séismes de faible magnitude (typiquement $M_b < 3$) en domaine océanique permet de mieux comprendre des processus géodynamiques variés (magmatisme et tectonique le long des frontières en accréation, déformations diffuses intraplaques, etc). Ces processus engendrent des séismes dont la magnitude est le plus souvent faible à très faible et qui ne sont, par conséquent, pas observés – ou en tout cas imparfaitement localisés – par les réseaux sismologiques globaux. Les hydrophones présentent de nombreux avantages. Outre leur sensibilité d'au moins une unité de magnitude supérieure à un réseau de stations sismiques [Hanson2005], la dimension de la zone couverte par un faible nombre d'hydrophones est très étendue. Cette technologie est donc complémentaire à celle des réseaux sismiques océaniques (OBS, *Ocean Bottom Sismometer*) qui sont eux bien adaptés à l'étude de la micro-sismicité mais pour une zone limitée en raison de l'atténuation rapide dans la croûte. Enfin, l'installation des hydrophones est simple, leur technologie est bien maîtrisée, et leur maintenance est réduite en raison de leur longue autonomie.

La surveillance acoustique long terme de la micro-sismicité a déjà fourni des résultats encourageants. La détection de nombreux événements, la bonne précision des localisations, l'identification et la classification d'évènements, qui ont été réalisés, font de cette thématique une activité de recherche en plein essor au niveau international depuis quelques années. Cependant, des progrès importants restent à faire concernant notamment la compréhension des mécanismes de conversion sismo-acoustique, ainsi que des différents phénomènes physiques qui altèrent la forme du signal acoustique au cours de sa propagation dans l'eau. C'est pourquoi jusqu'à présent, les formes d'ondes des signaux acoustiques et les informations qu'elles contiennent n'ont été que très peu utilisées dans la recherche des mécanismes au foyer des séismes qui les ont engendrés, comme cela se fait depuis de nombreuses années en sismologie « terrestre ».

Ce document présente, dans une première partie, le contexte du programme de recherche liée à l'utilisation d'hydrophones à l'UMR-CNRS 6538 "Domaines Océaniques" de l'Université de Brest Occidentale (UBO). Dans une seconde partie, je présente les problèmes et les limitations qui sont rencontrés, ainsi que l'apport scientifique dans le problème général de l'étude des mécanismes de rupture que représenterait mon intégration au laboratoire UMR 6538 « Domaines Océaniques » à Brest, en tant que spécialiste de la modélisation de la propagation acoustique.

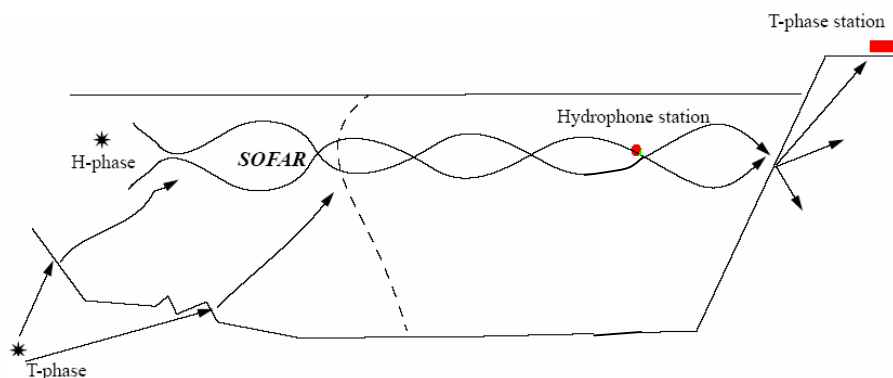


Figure 1 : Représentation schématique d'un guide d'onde océanique en eau profonde. Le profil de vitesse de propagation du son de type Munk (en pointillés) présente un minimum (en général entre 800m et 1000m de profondeur) où les ondes acoustiques sont réfractées. En basses fréquences (0-10Hz), l'atténuation dans l'eau est négligeable, ces ondes se propagent donc sur plusieurs milliers de kilomètres dans le canal SOFAR.

I – CONTEXTE

Le programme hydroacoustique à Brest : Etude de la sismicité de l'Océan Atlantique Nord par Mesures Hydroacoustiques

Le projet « MoMAR » (*Monitoring the Mid-Atlantic Ridge*) a été développé pour promouvoir une observation coordonnée, multidisciplinaire et à long terme, du fond de l'océan dans la zone de la dorsale Médio-Atlantique proche de l'archipel des Açores (35°N-40°N). Les dorsales Médio-océaniques sont situées dans les zones où les plateaux tectoniques divergent. Le magma, se déplaçant sous la surface, est parfois sujet à une éruption au fond de l'océan. Une déformation se produit. La circulation résultante de fluides transfère de la chaleur de la croûte terrestre vers l'eau de mer, et modifie également la composition chimique de l'océan. Ces processus affectent donc à leur voisinage l'équilibre chimique, thermique et biologique de l'environnement océanique, et ils fournissent aussi le meilleur modèle disponible pour comprendre les mécanismes qui furent probablement à l'origine de la vie sur terre.

Les processus biologiques, chimiques et volcaniques qui contrôlent l'environnement de la dorsale sont actifs sur de relativement courtes périodes. Ils interagissent étroitement et se produisent sur une large gamme d'échelles spatiales. L'objectif du projet MoMAR est de comprendre ces processus et la nature de leurs interactions. Pour mener ces recherches, des méthodes classiques qui impliquent des expériences en mer pour collecter des données et des échantillons ne sont pas suffisantes. En effet, les différents processus mentionnés précédemment se révèlent être très variables dans le temps. Par conséquent, des observations multidisciplinaires coordonnées sont nécessaires, et impliquent le déploiement à long terme d'instruments de mesures nécessitant des campagnes en mer planifiées sur une période de plusieurs années.

Les variations spatiales et temporelles des processus thermiques précédemment cités sont les conséquences directes de la rhéologie de la lithosphère et de la croûte. Ces variations dans la rhéologie vont en retour contraindre la distribution des déformations dans l'espace et dans le temps. Des observations directes par sondage des structures permettent de localiser et quantifier les différents types de failles, mais elles ne permettent pas de connaître la distribution spatiale et temporelle de leur activité sismique. A ce titre, la localisation précise des nombreux séismes de faible amplitude est importante. Pour cela deux techniques complémentaires sont utilisées : d'une part, le déploiement de sismomètres au fond de l'océan (OBS), bien adaptés pour des études locales en raison de l'atténuation importante dans la croûte, et d'autre part, le mouillage de réseaux d'hydrophones, bien appropriés pour la surveillance de l'activité sismique océanique à grande échelle.

Une première expérience de mouillage d'hydrophones autonomes, conduite par l'UMR 6538 « Domaines Océaniques », a permis d'acquérir la maîtrise de cette technologie et de l'interprétation des données. Il s'agit de l'expérience « SIRENA » (*Seismic Investigation by REcording of Acoustic Waves in the North Atlantic*) qui a eu lieu entre le 17 mai et le 3 juin 2002. La campagne SIRENA a été le résultat d'une coopération internationale entre des laboratoires de trois pays, tant au cours de la phase de soumission du projet qu'au cours de la campagne elle-même :

- le Laboratoire UMR6538/CNRS à Brest ; le Laboratoire de Géophysique Marine de l'IPG Paris et le DASE du CEA à Bruyères-le-Châtel, en France;
- le PMEL/NOAA, à Newport, Oregon aux Etats-Unis;
- le Laboratoire de Géophysique Marine de l'Université de Lisbonne, l'Université de l'Algarve à Faro et l'Université des Açores à Ponta Degada) au Portugal.

Cette campagne a permis le mouillage de six hydrophones autonomes sur les flancs de la Dorsale Médio-Atlantique, au nord du Plateau des Açores, entre les latitudes 40°20'N et 50°30'N. Ces hydrophones ont enregistré pendant un an et demi les signaux acoustiques engendrés par les séismes de la Dorsale. Ces signaux acoustiques permettent de localiser, avec une grande précision (mieux que 2 kilomètres), les points de conversion sismo-acoustique pour les séismes se produisant sur l'axe de la Dorsale. Les objectifs de cette étude consistent à :

- mieux comprendre les processus de l'accrétion, dans un contexte d'interactions entre une dorsale lente et un panache mantellique.
- mesurer l'activité sismique de la zone MoMAR

Les hydrophones déployés lors de la campagne SIRENA ont été récupérés et les données ont été recueillies lors de la campagne SIRENA-2/D274 entre le 12 septembre et le 1er octobre 2003. Suite à l'expérience SIRENA, la campagne « MARCHE » (*Mid-Atlantic Ridge Comprehensive Hydrophone Experiment*) est programmée pour avril 2006. L'expérience MARCHE va être consacrée au mouillage d'un réseau de huit hydrophones autonomes sur les flancs de la Dorsale Médio-Atlantique, au nord et au sud des Açores. Trois nouveaux sites seront instrumentés au nord des Açores et trois autres instruments, situés à l'ouest et au sud de l'archipel feront l'objet d'une maintenance. Deux de ces quatre instruments ont été

mouillés en juin 2005 lors de la campagne 182/3 du N/O Knorr, les deux autres au cours de la campagne Hydro-MOMAR-05 du N/O Arquipélago.

L'enregistrement par ces six instruments, sur une durée pouvant aller jusqu'à deux ans, des signaux acoustiques générés par les très nombreux séismes de faible magnitude se produisant le long de la Dorsale Médio-Atlantique, vise à atteindre deux objectifs principaux :

- déterminer les distributions dans le temps et dans l'espace de la sismicité le long d'une section d'extension notable (30°N à 50°N environ) de la Dorsale Médio-Atlantique, pour :
 - caractériser, grâce à des observations réalisées sur une période de temps suffisamment longue, les processus volcaniques et tectoniques actifs le long de cette dorsale.
 - comprendre l'influence du point chaud des Açores sur ces processus.
- réaliser une surveillance acoustique à long terme du chantier MoMAR et des segments voisins de la Dorsale. Cette surveillance acoustique, par sa longue durée d'observation et par l'étendue de la zone sur laquelle seront localisés les séismes (5° de latitude environ) fournira des données très complémentaires de celles qui seront acquises grâce aux instruments fond de mer déployés sur le chantier MoMAR et dans son voisinage immédiat, au cours d'autres campagnes (par exemple, lors de la campagne SISMOMAR).

Les résultats obtenus en 2003, par l'interprétation conjointe des données recueillies par deux réseaux mouillés au sud et au nord des Açores, ont montré en particulier :

- la capacité des réseaux d'hydrophones autonomes à détecter et localiser avec précision un très grand nombre de séismes de faible magnitude.
- la possibilité offerte d'associer ces séismes aux structures particulières de la Dorsale Médio-Atlantique (centres et extrémités de segments, discontinuités...)
- la caractérisation des processus actifs à l'axe de la MAR (séquences tectoniques ou essaims de séismes dus à des processus magmatiques. Ces processus présentent une grande variabilité dans le temps. La variabilité spatiale de la sismicité, avec la proximité des points chauds islandais et açorien, met en évidence l'influence de ces points chauds sur les processus de l'accrétion actifs le long de la MAR.

Dans la continuité de ces travaux, et compte-tenu de l'avenir prometteur de la technologie hydroacoustique pour la surveillance sismique des domaines océaniques, il est prévu de constituer un parc national d'hydrophones autonomes afin d'étudier d'autres sites : les trois dorsales Indiennes, la déformation intra-océanique intense de l'océan Indien (très difficile à étudier par OBSs car distribuée sur une zone très étendue), la subduction Java-Sumatra, la subduction des Antilles (en complément des stations hydroacoustiques permanentes du CTBTO : 3 dans l'océan Indien et 2 aux Antilles). Les premières campagnes en mer ont permis de maîtriser la technologie des hydrophones, il reste néanmoins des progrès à faire sur l'interprétation des signaux acoustiques pour pouvoir traiter les différents problèmes géodynamiques.

II - Problèmes rencontrés, limitations, et perspectives

Les localisations d'ondes T, jusqu'à présent effectuées, ne donnent pas nécessairement une estimation de l'épicentre réel du séisme, mais fournissent la position d'une zone ponctuelle de conversion sismo-acoustique au niveau du fond de l'océan. Dans le cas des dorsales médio-océaniques, cette différence est, à ce jour, considérée comme n'étant pas trop importante dans certaines études [Fox1995, Fox2001, Hanson2005] qui considèrent que les zones de conversion sont moins compliquées que dans d'autres zones, car les foyers des séismes des dorsales sont superficiels (à quelques kilomètres sous le fond). Cependant, en raison des fortes variations bathymétriques au niveau des dorsales, ces hypothèses peuvent être remises en cause. Dans le cas des zones de subduction [deGroot1999, Graeber2004], ou plus généralement proches des côtes [Tolstoy2005], les trajets de propagation dans la croûte peuvent être assez longs avant que la conversion acoustique se produise. En outre, le transfert d'énergie sismique-hydroacoustique s'effectue sur une zone spatiale qui n'est pas nécessairement ponctuelle.

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire d'améliorer notre compréhension des mécanismes de la conversion sismo-acoustique de façon à prédire plus précisément les temps de propagation et d'améliorer la précision sur les localisations des foyers. Au delà de la localisation d'un unique point de conversion par inversion des temps d'arrivée, une modélisation devrait permettre d'étudier l'étendue spatiale de la zone de conversion et d'en étudier les mécanismes, ce afin de caractériser leur influence sur le signal acoustique mesuré. En outre, des informations issues du signal acoustique (type d'évènements, profondeur, magnitude du séisme) peuvent être déduites s'il on connaît bien les toutes les propriétés de la propagation acoustique dans l'eau.

Modélisation de la conversion sismo-acoustique et des mécanismes de création d'ondes T

Les mécanismes de création d'ondes T sont encore peu ou mal connus et font partie des préoccupations actuelles des communautés internationales de l'acoustique sous-marine et de la géophysique. C'est pourquoi d'importants programmes de recherche sont orientés actuellement vers une meilleure connaissance de ces phénomènes. Bien comprendre les mécanismes de sources dans la création d'ondes T est indispensable afin de pouvoir exploiter les données hydroacoustiques et en déduire des informations sur les mécanismes de la rupture.

La théorie des rayons prédit qu'en raison de la forte rupture d'impédance entre la croûte océanique et l'océan, les ondes P excitées par une source dans la croûte ou dans le manteau supérieur sont transmises presque verticalement dans la colonne d'eau. Deux mécanismes, ou leur combinaison [Park2001], sont communément invoqués pour expliquer comment une source dans la croûte peut exciter des ondes acoustiques se propageant pratiquement horizontalement, piégées dans le canal SOFAR. Ces deux mécanismes sont :

- la propagation le long d'une pente descendante [Tolstoy1950, Talandier1998] qui prédit que des interactions répétées avec la pente conduisent à la propagation d'une onde acoustique pratiquement horizontale,
- la diffraction multiple ou diffusion par une rugosité de surface du fond de l'océan [deGroot1999, deGroot2001] qui favoriserait le couplage à l'interface eau/croûte.

Concernant ces deux hypothèses, la discrétisation en « marches d'escalier » de la bathymétrie, généralement utilisée dans les modèles, peut conduire à de la diffraction artificielle due à des artefacts numériques, si le pas d'incrémentation suivant la distance principale de propagation n'est pas suffisamment petit par rapport à la longueur d'onde. Une modélisation numérique menée par de Groot-Hedlin [deGroot2004] a visé à analyser ces deux mécanismes d'excitation des ondes T supposés, et à déterminer leur importance relative. En particulier, il a s'agit également d'éliminer toute possibilité d'une éventuelle présence d'artefacts numériques pour comparer ces deux mécanismes de création d'ondes T. L'auteur conclut que la diffraction par le fond serait alors le phénomène prédominant, y compris dans les régions présentant de fortes ruptures d'impédance.

Dans le cadre de mon post-doctorat à Scripps, j'ai étudié les caractéristiques non linéaires de la propagation acoustique de sources de fortes amplitudes. Cette étude, dans le cadre du respect du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (CTBT), visait à déterminer une « signature acoustique » à longue distance d'éventuelles explosions sous-marines. J'ai développé un modèle numérique hybride couplant un code [McDonald1987], basé sur une équation parabolique, simulant la propagation acoustique non linéaire proche de la source, avec un code linéaire de sommation de modes propres [Porter1991], qui permet un calcul plus rapide pour de longues distances de propagation, lorsque l'amplitude du champ devient suffisamment faible pour pouvoir considérer la propagation comme étant linéaire [Castor2004-2]. L'un des résultats majeur de cette étude concerne l'interaction non linéaire onde-onde, connue sous le terme d'« interaction paramétrique », qui peut être vue schématiquement comme une diffusion du son par le son. L'interaction paramétrique produit, au cours de la propagation, une cascade de nouvelles composantes (fréquence ; nombre d'onde) dans le champ acoustique. Cette propriété de la propagation des ondes a été largement étudiée dans de nombreux domaines. Cependant, j'ai pu observer que ce phénomène physique pouvait favoriser le couplage entre les sédiments et l'eau, et donc participer aux mécanismes de création d'ondes T [Castor2004-1]. Le nombre de modes propagatifs augmente classiquement avec la fréquence. Quand la source est dans le SOFAR, tous les modes sont excités. En revanche, lorsque la source est proche du fond marin, les modes d'ordre faible, piégés dans le SOFAR, ne se sont pas excités. Donc, lorsque l'amplitude de la source proche du fond est faible, seuls les modes d'ordre élevé sont excités. Le résultat important est que lorsque l'amplitude de la source est suffisamment grande pour considérer les effets non linéaires dans la propagation, le couplage des modes conduit, au voisinage de la source, à l'excitation

de modes d'ordre faible portés par une onde très basse fréquence générée par interaction paramétrique. Même lorsque la source est proche du fond, les non linéarités induisent cette excitation de modes d'ordre faible qui contribue à l'augmentation du couplage entre l'eau et le fond. Cette étude a donc montré qu'une forte amplitude de source participe aux mécanismes de création d'ondes T.

Afin de modéliser la conversion sismo-acoustique, je compte adapter des codes existants et développer un modèle hybride afin de traiter le problème dans ses 3 étapes : 1 - description de sources volumiques polarisées correspondant aux différents types de mécanismes de rupture au foyer du séisme ; 2 – propagation dans un milieu multicouche de fluides élastiques, ou poro-élastiques, avec la conversion sismo-acoustique ; 3 – propagation acoustique dans l'océan à très longue-distance. L'utilisation d'un modèle hybride permettra de pouvoir adapter les modèles et ne prendre en compte que les phénomènes physiques prédominant au cours de chacune de ces trois étapes, afin de réduire les temps de calcul.

Il existe des codes qui permettent de simuler la propagation d'une onde sismique et de sa conversion en onde acoustique, comme par exemple le code CABRILLO, basé sur une méthode pseudo-spectrale. Ce code permet de modéliser la propagation acoustique dans un environnement océanique 2-D avec un fond poreux et élastique. Ce code (disponible sur <http://www.mpl.ucsd.edu/people/gerstoft/>) a été développé par Peter Gerstoft avec qui j'ai travaillé au MPL à Scripps qui a également développé SAGA, *Seismo-Acoustic Inversion based on Genetic Algorithms*, un code d'inversion basé sur un algorithme génétique pour estimer les paramètres géoacoustiques d'un milieu océanique).

On peut également noter qu'Henrik Schmidt du MIT a développé le code OASES (*Ocean Acoustics and Seismic Exploration Synthesis*, téléchargeable sur <http://acoustics.mit.edu/faculty/henrik/oases.html>) où une approximation locale de Rayleigh-Kirchhoff traite la transmission et réflexion d'ondes planes au niveau des interfaces verticales séparant un océan stratifié horizontalement. Schmidt a montré que l'excitation des ondes T peut être expliquée par le couplage d'ondes de cisaillement dans la croûte et d'ondes de surface sismiques, ce qui entraîne ensuite un rayonnement dans la colonne d'eau. Ce mécanisme de conversion de nombre d'onde implique que l'excitation des ondes T est plus importante pour des séismes produisant des ondes SV (Shear Vertical) que ceux produisant majoritairement des ondes P. En effet, il est important de noter que les problèmes de compréhension des mécanismes de génération des ondes T incluent les contributions relatives des différentes ondes sismiques (ondes P, ondes S, et ondes de surface) dans le couplage sismo-acoustique. Cela doit se traduire sur la durée, l'amplitude et probablement les caractéristiques spectrales de l'onde T.

Enfin, il est important d'insister sur le fait que l'excitation des ondes T est un effet complètement tridimensionnel. C'est pourquoi, bien que des modèles 2-D existant aient permis de mettre en lumière certains aspects du couplage sismo-acoustique, un modèle 3-D serait nécessaire pour prédire toutes les caractéristiques des ondes T de manière réaliste. A ce sujet, je prévois de poursuivre ma collaboration avec Frédéric Sturm de l'Ecole Centrale de Lyon, afin d'intégrer un fond élastique au modèle 3DWAPE (*3-Dimensional Wide Angle Parabolic Equation*) [Sturm2001, Castor2004-3, Castor2005] en s'inspirant du modèle RAMS (*Range-dependent Acoustic Model including Shear waves*). Le code RAMS, basé sur une équation parabolique et développé par M. Collins [Collins1991], modélise la propagation 2-D en tenant compte des ondes de cisaillement dans le fond de l'océan, ainsi que des ondes de surface et d'interface (Rayleigh, Stoneley). Une version de RAMS a été développée dans le domaine temporel au CEA et a permis de simuler la propagation d'un signal de type explosif sur plusieurs milliers de kilomètres au large du Japon [Sturm2004].

Enfin, des travaux sur la conversion sismo-acoustique ont commencé à l'UMR 6538 Domaines Océaniques avec la thèse d'A. Balanche qui a débuté en septembre 2005, et qui est encadrée par Claude Guénnou et Jean Goslin. En m'intégrant au laboratoire, je peux participer activement à cette étude qui a pour but notamment d'améliorer les localisations.

Modélisation de la propagation acoustique sous-marine longue distance

L'objet de cette partie est de lister brièvement, de manière non exhaustive, un certain nombre de phénomènes qui altèrent la propagation acoustique dans l'eau, parmi lesquels on peut citer :

- les effets 3-D. Ces effets se manifestent par une réfraction horizontale de l'énergie acoustique par des effets bathymétriques ou par des gradients horizontaux de vitesse de propagation du son (Fig. 2). Ils sont particulièrement importants lorsque la source et/ou le récepteur sont proches d'une pente [Castor2004-3, Castor2005].

- les effets de blocage partiel ou total dus à la bathymétrie. La présence de monts sous marins élevés sur le trajet de l'onde peut, par exemple, altérer fortement les signaux hydroacoustiques enregistrés en terme notamment de temps d'arrivée et de répartition d'énergie sur les modes.
- les effets de diffraction multiple et de diffusion liés à des inhomogénéités du milieu tels qu'une rugosité du fond de l'océan, ou bien encore l'action des ondes internes.

Effets 3-D

Dans la Figure 2, une illustration de la propagation « hors plan » (ou « effet 3-D ») montre comment la direction azimutale de l'énergie peut être altérée avec un simple fond plat et pentu. Pour cet exemple, il y n'y a pas d'effet compliqué sur le chemin du rayon autre que ses interactions avec le fond pentu, c'est-à-dire que la vitesse du son est une constante égale à 1500m/s et les deux interfaces du guide d'onde (fond marin et surface de l'eau) sont parfaitement réfléchissantes. Avec une vue de dessus, le rayon apparaît comme étant réfracté par rapport à sa direction initiale. Ce phénomène est appelé la réfraction horizontale. La réfraction horizontale (*i.e.* propagation « hors plan ») peut aussi être induite par une variabilité du profil de vitesse, par exemple, des courants tourbillonnaires, qui peuvent également défléchir l'énergie acoustique par rapport à une série de plans parallèles. Cependant, la topographie du fond marin est généralement le principal facteur contribuant à la réfraction horizontale.

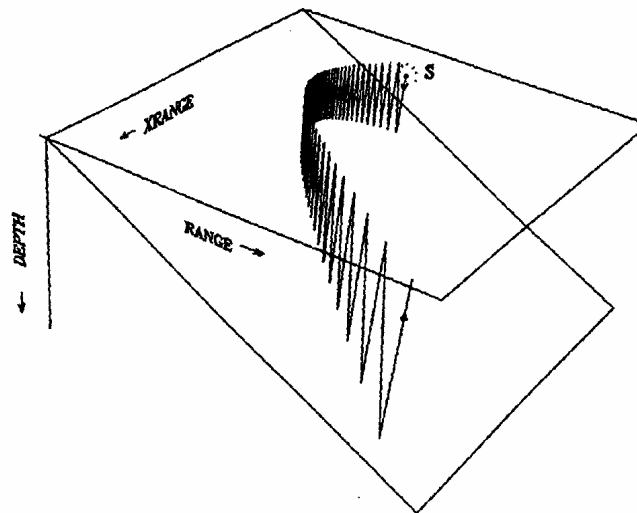


Figure 2 : Illustration de la réfraction horizontale pour un seul rayon provenant de la source S. Le chemin du rayon démarre obliquement lorsqu'il remonte la pente et au cours de ses réflexions multiples entre le fond, supposé ici parfaitement réfléchissant, et la surface de l'eau, le rayon est réfracté progressivement vers l'extérieur par rapport au sommet de la pente.

Diffraction multiple due aux hétérogénéités du milieu de propagation

Certaines ondes se propagent suivant des trajets simples. Qualifiées de «directes», elles sont les premières enregistrées par les stations d'observation. D'autres vont emprunter des chemins un peu plus longs et compliqués. Effectivement, au cours de la propagation, les ondes traversent des milieux aux propriétés différentes : elles peuvent être réfléchies et/ou réfractées aux interfaces. Déviées de leur trajectoire initiale, elles arrivent avec quelques secondes de retard sur les ondes directes. Chaque fois qu'elle rencontre une hétérogénéité, une onde se divise en de multiples ondes secondaires d'énergie moindre qui, à leur tour, se subdivisent. Autant de détours qui rallongent le parcours et donc le temps de propagation du signal. Le régime atteint, qualifié de «diffus», se caractérise par une propagation de l'onde totalement aléatoire. On parle d'«equipartition» des modes. Ces transferts d'énergie d'onde à onde sont caractéristiques des milieux hétérogènes. Le train d'énergie observé à la

suite des maxima d'amplitude sur les signaux correspond donc à ce régime diffus ; il est classiquement appelé « coda » en sismologie [Campillo2003].

Les ondes H sont générées par des sources dans l'eau (explosions, éruptions volcaniques) (Fig. 1 et 3a). Dans un guide d'onde d'eau profonde, les modes élevés se propagent plus rapidement que les modes d'ordre faible. Par conséquent, au cours de la propagation, la dispersion modale en eau profonde se manifeste par une arrivée temporelle des modes les plus élevés aux plus faibles. En outre, un mode d'ordre élevé correspond à un nombre d'onde horizontal faible, et donc à un angle de propagation par rapport à l'horizontal élevé. Par conséquent, les modes élevés sont plus fortement atténués car ils interfèrent avec le fond de l'océan qui absorbe l'énergie acoustique. Seuls les modes d'ordre assez faibles sont bien canalisés dans le SOFAR et se propagent donc avec peu d'atténuation. C'est pourquoi, le maximum d'énergie d'une onde H est classiquement porté par les modes d'ordre faible, ce qui explique la forme de l'enveloppe de l'onde : le maximum d'énergie est à la fin du signal. L'onde H présente de l'énergie sur la bande (2-100Hz) et peut exhiber une pulsation de bulle caractéristique d'une explosion. L'onde T, en revanche, ne présente que très peu d'énergie au-delà de 30Hz, son maximum d'énergie étant autour de 10Hz. Elle dure plus longtemps (souvent plus d'une minute) en raison de la coda qui témoigne de son passage dans la croûte.

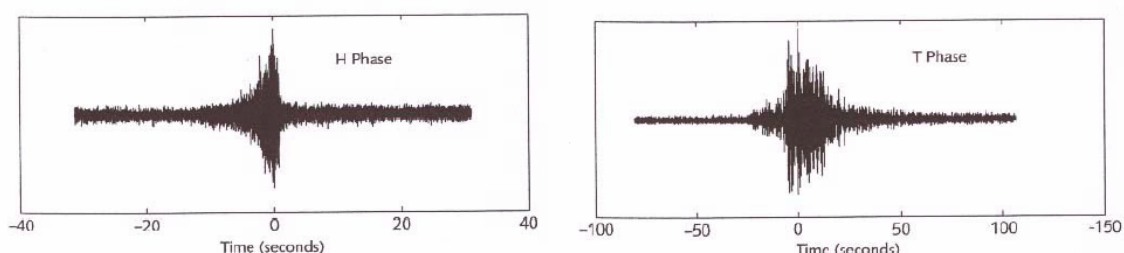


Figure 3 : Illustration de signaux classiques d'onde H et d'onde T. L'onde H, plus impulsive, présente une enveloppe caractérisée par l'arrivée temporelle des modes acoustiques des plus élevés au plus faibles. Le maximum d'énergie étant porté par les modes les plus faibles (vecteur d'onde proche de l'horizontale), les mieux canalisés dans le SOFAR. L'onde T, qui a transité dans la croûte, présente une durée plus longue, principalement en raison de la présence d'une coda, caractéristique d'effets de diffusion observés lors d'un passage de l'onde dans un milieu fortement hétérogène.

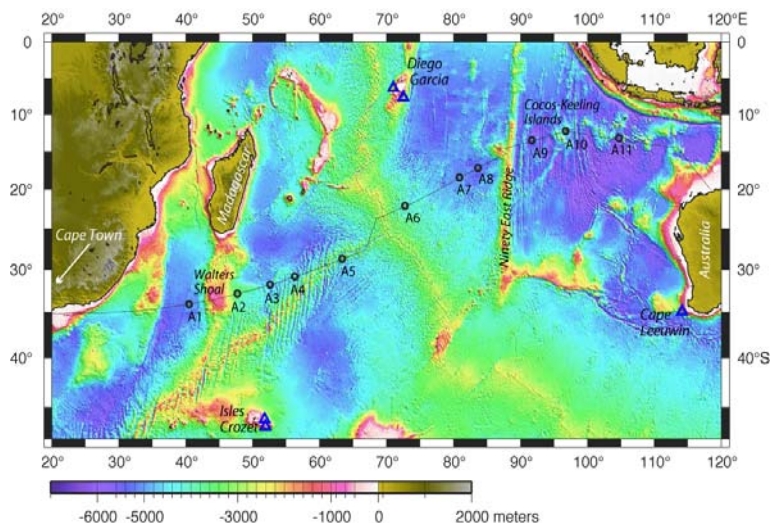


Figure 4 : Position des tirs de l'expérience Melville dans l'océan indien et des trois réseaux d'hydrophones

En 2003, une campagne de calibration du réseau d'hydrophones de l'Océan Indien du SSI (Système de Surveillance Internationale) a eu lieu [Blackman2003] (<http://mahi.ucsd.edu/dkb/ew0112.html>). Cette expérience, menée par Donna Blackman sur le bateau « Melville », a consisté au tir de vingt quatre explosions d'environ un kilogramme de TNT réparties dans l'Océan Indien. La Figure 4 représente le trajet du navire sur lequel sont superposés les onze points sources où des charges ont été utilisées. Les temps origines, le type de source (sources explosives ou sphères implosives), et la localisation (coordonnées GPS et profondeur) sont parfaitement connus pour les 24 tirs d'explosions. Les signaux correspondant à ces événements ont été enregistrés par les 3 stations du Système de Surveillance Internationale, correspondant chacune à un triplet d'hydrophones, à Cap Leeuwin (HA1), aux îles Crozet (HA4), et à Diego Garcia (HA8). Ces signaux ont montré, entre autres, un résultat intéressant : des enveloppes de type onde T, avec la présence d'une coda, peuvent être observés lorsque l'onde H

passer « à travers » la dorsale située à 90° de longitude (Fig. 5b). Cette forme d'onde est l'illustration de phénomènes de diffraction importants lors de ce passage. Pour modéliser la coda, il faudrait prendre en compte tous les effets qui y participent : la diffraction multiple, les effets 3D, le couplage des modes lié à la bathymétrie, et les ondes internes.

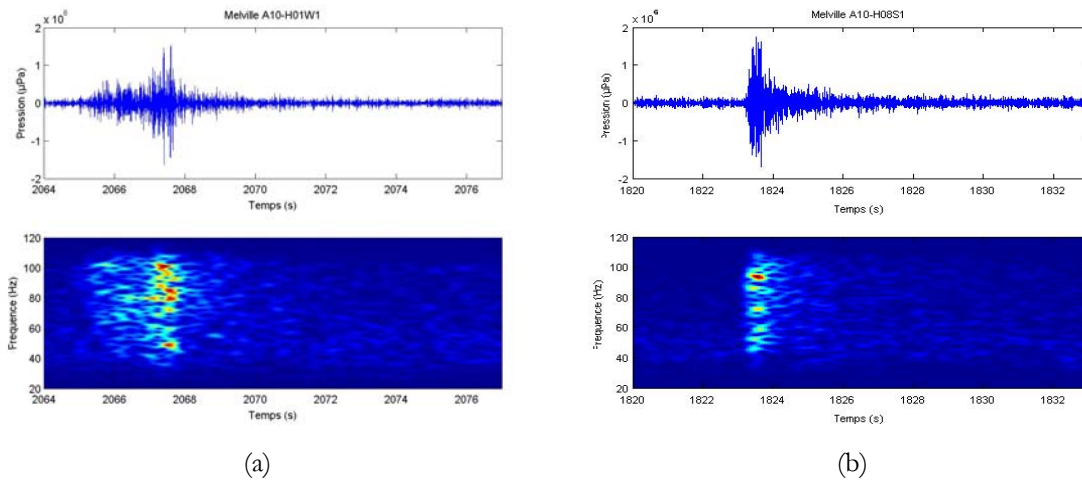


Figure 5 : Signaux expérimentaux enregistrés à partir de l'explosion A10 par les réseaux d'hydrophones Cape Leewin (H01) (a) et Diego Garcia (H08) (b)

Ondes Internes

Des focalisations et des trous d'énergie sont observables sur les spectrogrammes des signaux hydroacoustiques enregistrés (Fig. 5). Ce scintillement est dû à l'action des ondes internes. Ce phénomène est causé par les fluctuations des profils de vitesses qui génèrent des couplages non négligeables entre les modes. L'action des ondes internes peut être modélisée numériquement par une perturbation stochastique ajoutée aux profils de vitesse (théorie de perturbation) [Colosi1996]. La base des modes propres du guide se trouve donc changée. Les fluctuations locales du profil de vitesse jouent un rôle de diffuseur de l'énergie acoustique. Les couplages importants entre les modes ont donc pour effet de redistribuer l'énergie de manière plus homogène sur un grand nombre de modes. Les modes ne se propagent plus de manière indépendante. Les modes d'ordre faible, par exemple, se couplent à des modes d'ordre plus élevé qui se propagent plus rapidement. À l'inverse, pour les modes d'ordre élevé, le couplage s'effectue préférentiellement avec des modes d'ordre plus faible qui se propagent plus lentement. Alors que les modes arrivent à des temps bien séparés en l'absence d'onde interne, un recouvrement entre les modes est observé en leur présence.

Tous ces phénomènes physiques, rapidement décrits dans ce document, participent à l'altération de la forme des signaux acoustiques au cours de la propagation dans l'eau sur de longues distances. Lors de mes précédents travaux de recherche, j'ai pu appréhender tous ces problèmes. Mon objectif scientifique est poursuivre mes recherches concernant la compréhension de ces phénomènes de propagation.

CONCLUSION

Intégration d'un acousticien à Brest

Je souhaite vivement intégrer le laboratoire "Domaines Océaniques" UMR-CNRS 6538 car mes objectifs de recherche s'inscrivent bien dans les programmes en cours du laboratoire concernant le déploiement d'un parc national d'hydrophones et l'étude à long terme des signaux hydroacoustiques. Mon intégration au laboratoire correspondrait également aux ambitions croisées de la communauté acoustique d'une part et géophysique/océanographique d'autre part, matérialisée par la création du G2RA. Dans la région brestoise, le groupe G2RA (Groupement Régional de Recherche en Acoustique Sous-Marine) s'est constitué en 1994 et réunit des industriels de la région, des universitaires, des écoles d'ingénieurs, le SHOM, le GESMA et l'IFREMER. Actuellement plusieurs écoles et laboratoires ont entamé des négociations de manière à concrétiser

en Bretagne l'installation d'un pôle d'Acoustique Sous-Marine (pôle d'Enseignement et de Recherche en Acoustique Sous-Marine « ERASM » regroupant l'École Navale, l'ENSIETA, l'ISEB, avec le soutien de Telecom Bretagne ; de l'EPSHOM, et du GESMA). Ce regroupement a pour but de mettre des programmes scientifiques en place, des moyens en commun, et de permettre d'échanger entre ces différents laboratoires des chercheurs et des doctorants. Des échanges et des collaborations entre des chercheurs et ingénieurs de ce pôle, spécialistes d'acoustique sous-marine, et des laboratoires du département Sciences de l'Univers du CNRS seront également développés. La communauté de l'Acoustique Sous-Marine apparaît ainsi vouloir établir de véritables collaborations avec des laboratoires d'océanographie et de géophysique [Sessarego2001].

Moyens et collaborations

Pour mener à bien le projet de recherche développé ci-dessus, outre les moyens des laboratoires brestois, je continuerai à bénéficier du soutien du LDG/CEA sur les points suivants :

- la possibilité de continuer à disposer d'un compte utilisateur sur les supercalculateurs du CCRT (Centre de Calcul Recherche et Technologie) et de bénéficier ainsi des capacités de calcul numérique massivement parallèle du CEA,
- Olivier Hyvernaud et Dominique Reymond du LDG/CEA à Pamatai en Polynésie sont chargés de la partie opérationnelle du bulletin sismique associé au dépouillement des données hydroacoustiques. Le LDG me donnera la possibilité de travailler plusieurs mois sur place. Leur expertise dans le domaine me permettra de compléter mes compétences en localisation, discrimination, et classification d'événements.
- la collaboration avec Julien Vergoz de l'équipe Détection et Sismologie Opérationnelle (DSO/LDG/DASE/DAM/CEA) chargé du traitement d'événements particuliers et de la mise en place d'une chaîne complète permettant un bulletin sismique grâce aux stations hydroacoustiques du LDG/CEA du Système de Surveillance International (SSI) sera poursuivie.

Mes travaux antérieurs m'ont permis d'acquérir une forte expérience dans le domaine, mais également d'échanger ou de travailler directement avec de nombreuses personnalités scientifiques et spécialistes des ondes T. Parmi ces chercheurs, avec qui des collaborations seront poursuivies, on peut citer, au niveau national :

- Pierre-Franck Piserchia, Chef de projet hydroacoustique au CND (*Centre National de Données*) et Chercheur LDG/CEA,
- Bruno Feignier, Directeur du Laboratoire de Détection et de Géophysique, CEA/DAM/DASE, et Vice-Président de l'EMSC (European-Mediterranean Seismological Centre),
- Jacques Talandier, ancien Chef du LDG Pamatai et conseiller scientifique du CEA,

et au niveau international :

- Bill Kuperman, Président de l'ASA (*Acoustical Society of America*) et Directeur du MPL, Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA,
- Peter Gerstoft, Chercheur au Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, et ancien *Seismic-Acoustic Officer, Waveform Development Unit, International Data Centre Division*, CTBTO, Vienne, Autriche,
- Ed. McDonald, Chercheur au *Naval Research Laboratory, Office Naval Research*, Washington DC, USA,
- Franck Graeber, *Seismic-Acoustic Officer, Waveform Development Unit, International Data Centre*, CTBTO, Vienne, Autriche,
- Andrew Forbes, Directeur de l'*Hydroacoustic Monitoring Unit, Acoustic Monitoring Section, International Monitoring System Division*, CTBTO, Vienne, Autriche,
- Emile Okal, Professeur, NorthWestern University of Chicago, USA.
- Catherine de Groot-Hedlin, Chercheur à *Scripps Institution of Oceanography*, USA.
- Ralph Stephen, Chercheur au *Woods Hole Oceanographic Institution*, USA.

Ces collaborations nationales et internationales représentent un réel atout pour mener à bien mon projet, et me permettre ainsi une adaptation rapide dans ce programme de travail.

BIBLIOGRAPHIE

[Blackman2003] D. Blackman, J. Mercer, R. Andrew, C. de Groot-Hedlin, and P. Harben, *Indian Ocean Calibration Tests: Cape Town-Cocos Keeling 2003*, 25th Seismic Research Review - Trends in Nuclear Explosion Monitoring (2003).

- [Castor2004-1] Castor K., Gerstoft P., Roux Ph., Kuperman W. A., McDonald B. E., *Long range propagation of finite amplitude acoustic waves in an ocean waveguide*, T-phase Workshop: "Seismo-Acoustic Applications in Marine Geology and Geophysics", Woods Hole Oceanographic Institution, MA, USA, mars 2004.
- [Castor2004-2] Castor K., Gerstoft P., Roux Ph., McDonald B. E., Kuperman W. A., *Long Range Propagation of Finite Amplitude Acoustic Waves in an Ocean Waveguide*. J. Acoust. Soc. Am., **116**, 2004-2010 (2004).
- [Castor2004-3] Castor K., Sturm F., Piserchia P.-F., *Acoustical propagation modeling using the three-dimensional parabolic equation based code 3DWAPE within a multiprocessing environment*, J. Acoust. Soc. Am. **116**, 2549 (2004)
- [Castor2005] Castor K., Sturm F., Piserchia P. F., *Analysis of 3-D Acoustical Effects in a Realistic Oceanic Environment*, Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results Int. Conf., Heraklion, Crete, Greece, juin 2005.
- [Campillo2003] Campillo, M., & Paul, A, *Long range correlations in the seismic coda*. Science **299**, 547-549 (2003).
- [Colosi1996] Colosi, J. A., *Mode coupling by internal waves for multimegameter acoustic propagation in the ocean*, J. Acoust. Soc. Am. **100**(6), (1996).
- [deGroot1999] de Groot-Hedlin, C. D., and Orcutt, J. A. *Synthesis of earthquake generated T-waves*, Geophys. Res. Lett. **26**, 1227–1230 (1999).
- [deGroot2001] de Groot-Hedlin, C. D., and Orcutt, J. A. *Excitation of T-phases by seafloor scattering*, J. Acoust. Soc. Am. **109**, 1944–1954 (2001).
- [deGroot2004] de Groot-Hedlin C., *Criteria for discretization of seafloor bathymetry when using a staircase approximation: Application to computation of T-phase seismograms*, J. Acoust. Am. **115**, 1103 (2004).
- [Fox1995] Fox, C. G., Radford, W. E., Dziak, R. P., Lau, T. –K., Masumoto, H., Schreiner, A. E., *Acoustic detection of a seafloor spreading episode on the Juan de Fuca ridge using military hydrophone arrays*, Geophys. Res. Lett., **22**(2), 131-134 (1995).
- [Fox2001] Fox, C. G., Matsumoto, H., Lau, T. A., *Monitoring Pacific Ocean seismicity from an autonomous hydrophone array*, J. Geophys. Res., **106**, 4183-4206 (2001).
- [Graeber2004] Graeber, F. M., Piserchia, P. –F., *Zones of T-wave excitation in the NE Indian Ocean mapped using variations in back azimuth over time obtained from multi-channel correlation of IMS hydrophone triplet data*, Geophys. J. Int. **158**, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02301.x., (2004).
- [Hanson2005] Hanson, J. A., Bowman J. R., *Indian Ocean ridge seismicity observed with a permanent hydroacoustic network*, Geophys. Res. Lett. **32**, L06301 doi:10.1029/2004GL021931 (2005).
- [McDonald1987] B. E. McDonald, W. A. Kuperman, *Time domain formation for pulse propagation including nonlinear behaviour at a caustic*. J. Acoust. Soc. Am. 81 (5), May 1987.
- [Park2001] Park, M., Odom, R. I., and Soukup, D. J. *Modal scattering: A key to understanding oceanic T-waves*, Geophys. Res. Lett. **28**, 3401–3404 (2001).
- [Porter1991] Porter, M., *The KRAKEN normal mode program*, SAACLANTCEN SM-245, LaSpezia, Italy, 1991.
- [Talandier1998] Talandier, J., and Okal, E. A., *On the mechanism of conversion of seismic waves to and from T waves in the vicinity of Island Shores*, Bull. Seismol. Soc. Am. **88**, 621–632 (1998).
- [Tolstoy1950] Tolstoy, I., and Ewing, M. W. *The T phase of shallow focus earthquakes*, Bull. Seismol. Soc. Am. **40**, 25–51 (1950).
- [Tolstoy2005] Tolstoy, M., Bohnenstiehl, D. R., *Hydroacoustic constraints on the rupture duration, length, and speed of the great Sumatra-Andaman earthquake*, Seism. Res. Lett. **76**(4), 419-425 (2005).
- [Sessarego2001] « Perspectives de l'Acoustique Sous-Marine (ASM)- Rapport de synthèse », J. -P. Sessarego, DR CNRS au Laboratoire de Mécanique et Acoustique UPR 7051 et Responsable du Groupe ASM à la Société Française d'Acoustique (SFA) : <http://www.loa.espci.fr/sfa/fr>, Juillet 2001.
- [Sturm2004] F. Sturm, P. F. Piserchia, *Long-range propagation of broadband sound pulses using a seismo-acoustic PE model*, Proceedings of the 7th European Conference on Underwater Acoustics, Deft, 5-8 July, 2004.