



Propagation, Imagerie et Monitoring Acoustiques : Développements Méthodologiques et Expérimentaux pour des Systèmes Complexes en Géosciences

Yves Le Gonidec

► **To cite this version:**

Yves Le Gonidec. Propagation, Imagerie et Monitoring Acoustiques : Développements Méthodologiques et Expérimentaux pour des Systèmes Complexes en Géosciences. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Rennes 1, 2015. <tel-01168707>

HAL Id: tel-01168707

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/tel-01168707>

Submitted on 26 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MÉMOIRE D' HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Yves LE GONIDEC

CNRS-UMR6118, OSUR-Université de Rennes 1
Géosciences Rennes

**PROPAGATION, IMAGERIE ET MONITORING ACOUSTIQUES :
DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES ET EXPÉRIMENTAUX
POUR DES SYSTÈMES COMPLEXES EN GÉOSCIENCES**

Soutenue le 28 mai 2015 - Composition du jury

V. Tournat	Directeur de Recherche (CNRS, Le Mans)	Rapporteur
V. Sallarès	Chercheur (CSIC, Barcelone)	Rapporteur
A. Mangeney	Professeur (Univ. Paris Diderot)	Rapporteur
G. Grandjean	Directeur de Recherche (BRGM, Orléans)	Examineur
C. David	Professeur (Univ. Cergy-Pontoise)	Examineur
A. Amon	Maître de Conférence (Univ. Rennes 1)	Examineur

Résumé

Les ondes acoustiques transportent de l'information relative aux propriétés physiques du milieu de propagation et peuvent ainsi contribuer à l'imagerie de la structure interne et au monitoring de la dynamique de systèmes complexes tels que les fonds marins, les massifs rocheux et les systèmes volcaniques hydrothermaux. La synthèse des travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'inscrit dans cette approche globale : de nouvelles méthodes d'analyse sismique multiéchelle par réponse en ondelettes et de simulation de propagation sont mises au point pour l'étude de milieux granulaires immergés ; par déstabilisation gravitaire, les émissions acoustiques induites par réarrangements des grains peuvent être exploitées comme précurseurs et signatures du régime d'avalanche ; l'analyse sismique multiéchelle permet de proposer de nouveaux attributs sismiques tenant compte de sources large bande à support fréquentiel limité et d'aborder la fusion de données multicapteurs dans le formalisme des ondelettes ; des sondages sismiques associés à l'identification de microsismicité induite dans un massif argileux en cours d'excavation renseignent sur l'initiation de la zone endommagée par redistribution des contraintes géomécaniques. Ces travaux de recherche, dont le contexte et les publications scientifiques associées introduisent ce mémoire, donnent lieu à des perspectives de valorisation illustrées en dernière partie.

Table des matières

Présentation administrative	7
I Encadrement scientifique, activités d'enseignement	10
II Principaux projets scientifiques	11
III Campagnes d'acquisition de mesures <i>in situ</i>	13
IV Responsabilités	15
Publications scientifiques	17
I Publications de rang A	19
II Autres publications	20
III Communications à congrès	21
IV Séminaires de laboratoires	24
Synthèse des travaux de recherche	25
I Propagation acoustique en milieux granulaires immergés : méthodes expérimentales et simulation	29
I.1 Caractérisation acoustique d'un réflecteur granulaire par réponse en ondelettes	29
I.2 Caractérisation du régime d'instabilité granulaire par analyse des émissions acoustiques	34
I.3 Simulation de propagation d'une onde acoustique dans un milieu granulaire immergé	37
II Imagerie sismique de réflecteurs immergés : subsurface et surface sédimentaires, structures océanographiques	41
II.1 Subsurface : développements méthodologiques de sismique haute résolution basés sur la réponse en ondelettes	41
II.2 Fonds marins : identification de textures hétérogènes par imagerie de rétrodiffusion acoustique	50
II.3 Interfaces océanographiques : réflectivité sismique multiéchelle	52
III Monitoring par sondages acoustiques et micro-sismicité d'un massif argileux en cours d'excavation	57
III.1 Description du contexte des expérimentations acoustiques <i>in situ</i>	57

III.2 Sondages acoustiques du segment de roche	60
III.3 Microsismicité induite par le processus d'excavation	63
III.4 Mécanismes de l'endommagement	65
III.5 Discussion et conclusion	67
Perspectives de recherche	69
Références bibliographiques	77
Annexe : sélection d'articles	85

Présentation administrative

Yves LE GONIDEC

Chargé de Recherche CNRS

Laboratoire : Géosciences Rennes UMR6118

Équipe : Imagerie Géophysique des Systèmes Complexes

Adresse : Bât. 15, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes

E-mail : yves.legonidec@univ-rennes1.fr

Formation, parcours professionnel

- *Depuis 2007* : **Chargé de Recherche**, 1^{ère} classe, Géosciences Rennes
- *2003 – 2007* : **Chargé de Recherche**, 2^{ème} classe, Géosciences Azur, Villefranche-sur-Mer
- *2002 - 2003* : **Post-doctorat**, NIWA¹, Wellington (Nouvelle-Zélande)
- *1998 - 2001* : **Doctorat**, Sciences de la Terre, Université de Rennes 1, soutenue le 28 novembre 2001 - Sujet : *Caractérisation d'interfaces et de milieux complexes par analyse sismique multi-échelle.*
- *1997 - 1998* : **DEA** Sciences de la Terre, Université de Rennes 1 - Sujet : *Etude du retournement temporel des ondes en cuve acoustique.*

Chronologie du cursus post-doctoral

Post-doctorat - NIWA - Les travaux de recherche que j'ai menés au NIWA ont porté sur l'exploitation de données d'imagerie acoustique acquises par sondeur multifaisceaux (EM300, navire océanographique Tangaroa). A partir des données acoustiques et de vérités terrain, j'ai développé une méthode d'identification de substrats géologiques hétérogènes, localisés dans une zone à dynamique sédimentaire complexe (détroit de Cook) et sur un volcan sous-marin (Haungaroa), en définissant les signatures angulaires de rétrodiffusion acoustique de différents types de textures géologiques.

Chargé de recherche - Géosciences Azur², UMR 7329 - En intégrant Géosciences Azur, j'ai poursuivi mes recherches en Géosciences marines à travers les différents chantiers du laboratoire, notamment sur la thématique des risques naturels par glissement de pentes sous-marines. J'ai ainsi travaillé à l'interface entre deux communautés de chercheurs : des acousticiens et des géologues, dont les problématiques associant mesures *in situ* et développements méthodologiques requièrent des expériences et compétences pluridisciplinaires. Ces collaborations m'ont notamment permis de développer des expériences de campagnes à la mer pour l'acquisition de données acoustiques par différents sondeurs dont j'étais par ailleurs chargé d'assurer l'exploitation.

Chargé de recherche - Géosciences Rennes, UMR 6118 - A la suite d'une mobilité demandée pour recentrer mes activités de recherche sur les développements méthodologiques et expérimentaux de caractérisation acoustique de systèmes naturels en Géosciences, j'ai

1. NIWA : National Institute of Water and Atmospheric research, Nouvelle-Zélande

2. nouvellement Géoazur, Sophia-Antipolis

donc rejoint Géosciences Rennes où je mène des travaux de recherche sur différents systèmes complexes. A travers ces expériences, j'ai pris conscience des contraintes des mesures *in situ* et du besoin d'une meilleure compréhension de la physique d'interaction entre l'onde acoustique et le réflecteur géologique. Cette compréhension est indispensable afin d'optimiser l'analyse et l'interprétation des données acquises mais également de concevoir de nouvelles méthodes de caractérisation acoustique de systèmes complexes en Géosciences. Ceci m'a permis de coupler à la fois une démarche scientifique de recherche en milieux naturels et de recherche en laboratoire sur des milieux contrôlés.

I Encadrement scientifique, activités d'enseignement

Encadrement de doctorants :

2010-2013 : D. Imbert (IPR³)

- ▷ Directeur : S. McNamara
- ▷ Co-directeur : Y. Le Gonidec
- ▷ Date de soutenance : 29 novembre 2013
- ▷ Titre : Propagation d'ondes acoustiques dans une suspension de grains mobiles immergés : couplage de modèles discret et continu par la méthode des domaines fictifs.

2008-2012 : S. Ker (IFREMER⁴)

- ▷ Directeur : D. Gibert
- ▷ Co-directeur : Y. Le Gonidec
- ▷ Date de soutenance : 29 juin 2012
- ▷ Titre : Développement de méthodes d'imagerie sismique par grand fond et d'analyse multiéchelle par ondelettes pour la caractérisation à haute résolution du sous-sol marin.

Encadrements de stages de Master et de Licence :

- ▷ 2014 - Master 2 d'Acoustique (Université du Maine, collaboration IPGP⁵ et IFREMER) : caractérisation acoustique d'interfaces turbulentes.
- ▷ 2012 - Master 1 de Physique (collaboration IPGP) : dynamique d'une colonne à bulles par mesure de température et de signatures acoustiques.
- ▷ 2011 - Master 1 (collaboration IRMAR⁶) : caractérisation acoustique d'interfaces rugueuses : modélisation.
- ▷ 2011 - Licence 3 (collaboration IPR) : émissions acoustiques par des granulaires déstabilisés sous différents régimes d'écoulement gravitaire.
- ▷ 2010 - Master 1 (collaboration IRMAR) : caractérisation acoustique d'interfaces rugueuses : expérimentations.

3. IPR : Institut de Physique de Rennes

4. IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

5. IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris

6. IRMAR : Institut de Recherche Mathématique de Rennes

- ▷ 2009 - Licence 3 de Physique : caractérisation acoustique d'un essaim de bulles dans une matrice fluide.
- ▷ 2009 - Master 1 de Systèmes Complexes : rayonnement acoustique d'un transducteur piézo-électrique.
- ▷ 2008 - Master 2 de Science de la Terre : acoustique non-linéaire pour l'étude d'une zone rocheuse endommagée : tests de faisabilité *in situ* sur l'argilite du Mont Terri.
- ▷ 2007 - Master 1 : caractérisation expérimentale de la directivité multifréquence d'un transducteur piézo-électrique.
- ▷ 2006 - INSA ⁷ : Caractérisation géoacoustique des sorties de fluides sur le Delta profond du Nil à partir des données de Géosciences Azur.
- ▷ 2005 - Master 1 : Caractérisation géoacoustique par fusion de données géophysiques : cas du lobe distal de la zone occidentale du Delta du Nil.
- ▷ 2005 - Licence 3 : Comparaisons qualitatives de cartographies multifaisceaux des fonds marins.

Enseignements dispensés :

Depuis 2008 - Module Imagerie Géophysique, Master 2 de l'Université de Rennes 1 (8 h/an) : méthodes acoustiques multifréquences mises en œuvre pour la caractérisation de réflecteurs acoustiques/sismiques complexes.

2005 et 2007 - Travaux pratiques d'informatique et cours généraux sur les sondeurs acoustiques multifaisceaux et profileurs de sédiments, Master 2 de l'Université de Nice-Sophia Antipolis (10 h) : description des principes de fonctionnement de différents types de sondeurs acoustiques, depuis les conditions d'acquisition *in situ* jusqu'au traitement des données.

II Principaux projets scientifiques

Dans le cadre du GNR FORPRO ⁸

MO-A (2011-2016) : Exploitation de sources naturelles pour le monitoring pluriéchelle à long terme de sites en condition de stockage.

- ▷ Responsable : Y. Le Gonidec
- ▷ Partenaires : Géosciences Rennes, GEC ⁹, IPGP, METIS ¹⁰, Swisstopo ¹¹
- ▷ Dans le cadre de la surveillance à long terme de sites en condition de stockage, l'utilisation de sources naturelles se présente comme une alternative intéressante aux sources actives conventionnelles. Il s'agit notamment d'exploiter des sources ambiantes, telles que le bruit sismique, le bruit magnéto-tellurique ou encore l'émanation Radon associées aux variations de pression atmosphérique. Ce projet est actuellement toujours

7. INSA : Institut National des Sciences Appliquées

8. GNR FORPRO : Groupement National de Recherche FORMations géologiques PROfondes

9. GEC : laboratoire Géosciences et Environnement Cergy

10. METIS : Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols, Paris

11. Swisstopo : Office Fédéral de topographie, Suisse

en cours au laboratoire souterrain du Mont Terri (Suisse) et nécessite d'assurer des enregistrements continus sur plusieurs années.

Valorisation EZ-G08 (2009-2011) : Extension du projet EZ-G08 multiéchelle et multi-méthode : caractérisation, modélisation et monitoring de l'EDZ¹² dans le laboratoire souterrain du Mont Terri.

- ▷ Responsable : Y. Le Gonidec
- ▷ Partenaires : Géosciences Rennes, IPGP, ENS de Géologie Paris, CSIRO¹³, GEC, CNAB¹⁴, METIS, Swisstopo
- ▷ Le projet EZ-G08, décrit ci-dessous, a permis d'acquérir un important jeu de données géophysiques et géochimiques en lien avec l'EDZ induite par l'excavation d'une galerie. De part leur quantité et complexité d'interprétation, l'exploitation et la valorisation de ces données a nécessité un investissement sur plusieurs années avec une coordination dynamique des différentes équipes partenaires.

EZ-G08 (2007-2008) : Suivi spatio-temporel de l'EDZ dans le laboratoire souterrain du Mont Terri dans les zones instrumentées EZG04 et EZG08.

- ▷ Responsable : D. Gibert (IPGP)
- ▷ Partenaires : IPGP, Géosciences Rennes, ENS de Géologie Paris, CNAB, Swisstopo
- ▷ En 2008, le creusement d'une nouvelle galerie au laboratoire souterrain du Mont Terri a été l'opportunité de suivre l'évolution d'un front d'excavation, notamment en terme d'EDZ induite par les variations du champ de contraintes résultant. Ce projet a consisté à la conception et la mise en place de plusieurs expériences *in situ* originales, associant en particulier des méthodes acoustiques actives et passives, des méthodes électriques entre forages et de paroi, des mesures de potentiel spontané ainsi que des mesures géochimiques de teneurs en gaz rares.

Dans le cadre de l'ANR

DIAPHANE (2014-2018) : Imageries structurelle et fonctionnelle de volcans avec des rayons cosmiques.

- ▷ Responsable : D. Gibert (Géosciences Rennes)
- ▷ Partenaires : Géosciences Rennes, IPGP, IPNL¹⁵
- ▷ Ce projet, qui vient d'être financé, est constitué de différents volets géophysiques, dont un volet acoustique/sismique pour l'étude du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe dont la compréhension du fonctionnement requière la mise au point de méthodes de mesures géophysiques *in situ* complémentaires. D'une part, l'objectif principal du projet porte sur une nouvelle méthode d'imagerie géophysique de tomographie de densité par muons cosmiques générés dans l'atmosphère : cette méthode

12. EDZ : Excavation Damaged Zone

13. CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australie

14. CNAB : Chimie Nucléaire Analytique et Bioenvironnementale, Bordeaux

15. IPNL : Institut de Physique Nucléaire de Lyon

permet d'identifier les processus physiques à l'échelle du volcan. A plus petite échelle, des méthodes sismiques par exploitation du bruit ambiant et des ondes de surfaces vont être développées pour identifier et suivre les composantes multiphasiques de subsurface sur différents sous-systèmes actifs du volcan.

STABINGRAM (2011-2014) : Déstabilisation de milieux granulaires.

- ▷ Responsable : P. Gondret (FAST¹⁶)
- ▷ Partenaires : FAST, LAUM¹⁷, IPR, Géosciences Rennes
- ▷ Coordinateur Géosciences Rennes : Y. Le Gonidec
- ▷ En Géosciences, les glissements de terrain constituent des risques naturels aux processus de déclenchement complexes. Ceci a motivé le volet acoustique sur l'étude de la déstabilisation gravitaire d'interfaces granulaires immergées. Des développements expérimentaux ont permis d'aborder l'étude de précurseurs par émissions acoustiques, en collaboration avec les partenaires du projet. La caractérisation par sondage acoustique a également été développée expérimentalement et enrichie d'un volet simulation développé à l'occasion d'une thèse en co-direction avec l'IPR.

DOMOSCAN (2008-2012) : Quantification de la dynamique et suivi spatio-temporel du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe.

- ▷ Responsable : O. Coutant (ISTerre¹⁸)
- ▷ Partenaires : ISTerre, IPGP, Géosciences Rennes, LPAT¹⁹
- ▷ Le système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe est très complexe, caractérisé par un important réseau interne de fractures et de conduits d'où l'énergie thermique s'échappe sous forme de vapeur sous pression. En particulier, le gouffre Tarissan renferme un lac d'acide en ébullition localisé à 80 m de la surface, objet intéressant pour extraire de l'information sur le régime du système. Pour cela, un dispositif acoustique/sismique a notamment été conçu et mis en place pour assurer l'écoute passive de l'ébullition, une approche de surveillance du système hydrothermal difficile dans de telles conditions extrêmes de mesure.

III Campagnes d'acquisition de mesures *in situ*

Campagnes à la mer :

- ▷ MALISAR3 - Marge Nord Ligure, N/O²⁰ Suroît, 2008 : levés microbathymétriques avec le sondeur multifaisceaux EM2000 monté sur AUV²¹ sur 3 cibles principales : (a) zone épicertrale du séisme de 2001 sur une faille préalablement identifiée avec l'EM300, (b)

16. FAST : Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques, Orsay

17. LAUM : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans

18. Institut des Sciences de la Terre, Grenoble

19. LPAT : Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Tropical, Université des Antilles et de la Guyane

20. N/O : Navire Océanographique

21. AUV : Autonomous Underwater Vehicle

- déformations gravitaires liées au glissement lent de la couverture sédimentaire sur la pente continentale, et (c) cicatrices d'arrachement liées à des glissements récents.
- ▷ MALISAR2 - Marge Nord Ligure, N/O Suroît, 2007 : levés microbathymétriques avec l'EM2000 sur AUV, imagerie acoustique avec le sonar latéral SAR, profil sismique SAR et Chirp sur 3 cibles de la pente continentale : (a) localisation, cartographie et géométrie de failles actives et de (b) différents types de glissements gravitaires passés ou potentiels, et (c) étude de l'activité des transferts sédimentaires au sein de canyons sous-marins.
 - ▷ MATACORE - Marge de la Nouvelle-Zélande, N/O Marion-Dufresne, 2006 : transit valorisé pour des carottages de type Calypso sur des sites identifiés par des données géophysiques de 3.5 kHz : (a) mieux contraindre les flux sédimentaires, (b) reconstituer la succession des phénomènes gravitaires de méga-avalanches, comprendre les mécanismes de déclenchement et de mise en place des grandes instabilités sous-marines.
 - ▷ Bassin Ligure, N/O Europe, 2005 : essais technologiques et scientifiques du sondeur multifaisceaux EM2000 sur AUV.
 - ▷ AMADEUS - Marge Equateur/Colombie, N/O Atalante, 2005 : sismique légère, imagerie acoustique et bathymétrie EM12D et mesure de flux de chaleur pour : (a) identifier la géométrie des failles crustales associées à la zone sismogène, (b) identifier des instabilités de pente et des systèmes de transfert sédimentaire et (c) évaluer le temps de retour des grands séismes de subduction.
 - ▷ SIMED - Méditerranée Orientale, N/O Beautemps-Beaupré, 2004 : première campagne scientifique conduite conjointement avec le SHOM²² à bord du N/O Beautemps-Beaupré afin de couvrir les différents ensembles de la Ride Méditerranéenne par bathymétrie et imagerie acoustique multifaisceaux EM120 et sondeur de sédiments de type Chirp : volcanisme boueux, zones plissées ou encore cheminées gazeuses.
 - ▷ Détroit de Cook, Nouvelle-Zélande, N/O Tangaroa, 2002 : bathymétrie et imagerie acoustique EM300 de canyons sous-marins.

Campagnes à terre :

- ▷ Laboratoire de recherche souterrain du Mont Terri (Suisse) - Depuis 2008, plusieurs campagnes de mesures acoustiques/sismiques dans le cadre des projets EZ-G08 et MO-A : sondage acoustique et détection d'émissions acoustiques pour le suivi spatio-temporel d'une zone endommagée par excavation d'une galerie et monitoring long-terme par enregistrement du bruit sismique ambiant.
- ▷ Volcan de la Soufrière de Guadeloupe - 2010, 2011 et 2015 : campagnes d'acquisition de mesures acoustiques/sismiques dans le cadre du projet ANR DOMOSCAN : écoute acoustique du bruit ambiant émis par un lac en ébullition et enregistrement simultané du bruit sismique sur le flanc du volcan pour identifier le régime du système.

22. SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

IV Responsabilités

Responsable du laboratoire expérimental *Imagerie Géophysique de Géosciences Rennes* - En collaboration avec un Assistant Ingénieur, cette responsabilité consiste à gérer l'organisation à la fois technique et scientifique de l'activité du laboratoire. Il s'agit d'un laboratoire expérimental permettant de mettre au point des développements méthodologiques et instrumentaux nécessaires aux applications *in situ*. En particulier, la laboratoire est équipé d'une chaîne complète d'émission/réception de signaux acoustiques par des transducteurs piézo-électriques de fréquences comprises entre 0.1 et 3 MHz et de deux cuves acoustiques de 0.5 et 5 m³ équipées d'axes motorisés.

Responsable axe *Imageries* du Réseau Thématique de Recherche RISC-E²³ - Cette responsabilité, menée en collaboration avec l'IPR et l'IRMAR, a consisté à animer l'axe de recherche transverse *Imageries, Signaux et Mesures dans les Systèmes Complexes* entre les différents laboratoires partenaires. Les objectifs est de favoriser et dynamiser les échanges interdisciplinaires notamment à travers des conférences et des séminaires propices aux discussions et échanges interdisciplinaires. Cette démarche s'est par ailleurs concrétisée à travers la mise en place d'un réseau local de travail sur l'acoustique et les milieux granulaires, associant chercheurs et doctorants.

Précédentes responsabilités : *informatique, séminaires, données géophysiques* - Au sein de Géosciences Azur, je me suis en particulier chargé de la demande de mi-lourds informatiques : cet investissement, mené en collaboration avec les responsables informatiques et les utilisateurs de ressources informatiques du laboratoire, a permis d'acquérir un cluster de calculs. J'étais également en charge de l'organisation des séminaires internes au laboratoire, sur des thématiques multidisciplinaires. Les autres responsabilités que j'ai occupées portaient sur l'archivage/gestion des données géophysiques acquises durant les campagnes de mesures à la mer.

23. RISC-E : Recherches Interdisciplinaires sur les Systèmes Complexes en Environnement

Publications scientifiques

I Publications de rang A

Articles publiés

15. S. Ker, Y. Le Gonidec, L. Marié, Y. Thomas, and D. Gibert. “Multiscale Seismic Reflectivity of Shallow Thermoclines”. In: *Journal of Geophysical Research : Oceans* 120.3 (2015), pp. 1872–1886
14. D. Imbert, S. Mcnamara, and Y. Le Gonidec. “Fictitious domain method for acoustic waves through a granular suspension of movable rigid spheres”. In: *Journal of Computational Physics* 280 (2015), pp. 676–691
13. Y. Le Gonidec, J. Sarout, J. Wassermann, and C. Nussbaum. “Damage initiation and propagation assessed from stress-induced microseismic events during a mine-by test in the Opalinus Clay”. In: *Geophys. J. Int.* 198.1 (2014), pp. 126–139
12. S. Ker, Y. Le Gonidec, B. Marsset, G.K. Westbrook, D. Gibert, and T.A. Minshull. “Fine-scale gas distribution assessed from deep-towed seismic data”. In: *Geophys. J. Int.* 196.3 (2014), pp. 1466–1470
11. S. Ker, Y. Le Gonidec, and D. Gibert. “Multiresolution seismic data fusion with a generalized wavelet-based method to derive subseabed acoustic properties”. In: *Geophys. J. Int.* 195 (2013), pp. 1370–1383
10. Y. Le Gonidec, A. Schubnel, J. Wassermann, D. Gibert, C. Nussbaum, B. Kergosien, J. Sarout, A. Maineult, and Y. Guéguen. “Field-scale acoustic investigation of a damaged anisotropic shale during a gallery excavation”. In: *Int. J. Rocks Mech. Min. Sci.* 51 (2012), pp. 136–148
9. S. Ker, Y. Le Gonidec, and D. Gibert. “Multiscale seismic attributes : source-corrected wavelet response and application to high-resolution seismic data”. In: *Geophys. J. Int.* 190 (2012), pp. 1746–1760
8. S. Ker, Y. Le Gonidec, D. Gibert, and B. Marsset. “Multiscale seismic attributes : a wavelet-based method and its application to high-resolution seismic and ground truth data”. In: *Geophys. J. Int.* 187 (2011), pp. 1038–1054
7. S. Ker, B. Marsset, S. Garziglia, Y. Le Gonidec, D. Gibert, M. Voisset, and J. Adamy. “High-resolution seismic imaging in deep sea from a joint deep-towed/OBH reflection experiment : application to a Mass Transport Complex offshore Nigeria”. In: *Geophys. J. Int.* 182 (2010), pp. 1524–1542
6. S. Migeon, E. Ducassou, Y. Le Gonidec, P. Rouillard, J. Mascle, and M. Revel-Rolland. “The Late Quaternary western Nile deep-sea fan (Eastern Mediterranean) : A model for lobe construction and sand/mud segregation in a silt/mud-rich turbidite system”. In: *Sedimentary Geology* 229.3 (2010), pp. 124–143
5. Y. Le Gonidec and D. Gibert. “Multiscale analysis of waves reflected by granular media : Acoustic experiments on glass beads and effective medium theories”. In: *Journal of Geophysical Research* 112 (2007), pp. 381–390

4. Y. Le Gonidec and D. Gibert. “The Wavelet Response as a Multiscale Characterization of Scattering Processes at Granular Interfaces”. In: *Ultrasonics* 44 (2006), pp. 381–390
3. Y. Le Gonidec, G. Lamarche, and I.C. Wright. “Inhomogeneous Substrate Analysis using EM300 Backscatter imagery”. In: *Marine Geophysical Researches* 124 (2005)
2. Y. Le Gonidec, F. Conil, and D. Gibert. “The wavelet response as a NDT method”. In: *Ultrasonics* 41 (2003), pp. 487–497
1. Y. Le Gonidec, D. Gibert, and J.-N. Proust. “Multiscale analysis of waves reflected by complex interfaces : basic principles and experiments”. In: *Journal of Geophysical Research* 107 (2002)

II Autres publications

Publications, rapports

13. Y. Le Gonidec, C. Nussbaum, J. Sarout, J. Wassermann, and P. Bossart. “Microseismicity Induced in the Opalinus Clay by a Gallery Excavation in the Mont Terri Underground Rock Laboratory”. In: *Proc. American Rock Mechanics Association*. 2015
12. J.-L. Thiot, Y. Le Gonidec, and B. Kergosien. “Acoustic emissions in granular structures under gravitational destabilization”. In: *AIP Conf. Proc.* 1433 (2012), pp. 143–146
11. Ratzov G., Sosson M., Collot J.-Y., Migeon S., Michaud F., Lopez E. & Le Gonidec Y., Deslizamientos submarinos a lo largo del Margen Convergente del Norte de Ecuador - Sur de Colombia. Posible control tectónico, *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la costa continental hasta las islas Galapagos*, pp. 75-82, edited by Collot J-Y, V. Sallares, and A. Pazmiño, Publicacion CNDM-INOCAR-IRD, PSE001-09, Guayaquil, Ecuador, 2009.
10. Cattaneo A., Migeon S., Larroque C., Mercier de Lépinay B., Ruellan E., Sage F., Sosson M., Corradi N., Le Gonidec Y. & Fanucci F., Seafloor instabilities and sediment transport on the steep and seismically active Ligurian margin (North-Western Mediterranean), *33th International Geological Congress*, Oslo, Norvège, 2008.
9. Ratzov G., Sosson M., Collot J.-Y., Migeon S., Michaud F., Lopez-Ramos E. & Le Gonidec Y., Submarine Landslides Along The North Ecuador - South Colombia Convergent Margin : Possible Tectonic Control, *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, vol. 27(1), pp. 47-55, 2007.
8. Le Gonidec Y. et D. Gibert, Caractérisation multi-échelle d’interfaces complexes : milieux granulaires polydisperses, *8e Congrès Français d’Acoustique*, Tours, 2006.
7. Le Gonidec Y. and D. Gibert, Multifrequency analysis of underwater acoustic waves reflected by complex media : principles and water tank experiments, *Electronic Proceedings of IEEE Oceans’05*, Brest, 2005.

6. Le Gonidec Y. et D. Gibert, Réflexion d'une onde acoustique par une interface complexe analysée par une approche multifréquence, *9^{èmes} Journées d'Acoustique Physique, Sous-marine et UltraSonore*, Aix-en-Provence, 2005.
5. J.-Y. Collot, S. Migeon, G. Spence, Y. Le Gonidec, B. Marcaillou, J.-L. Schneider, F. Michaud, A. Alvarado, J.F. Lebrun, M. Sosson, and A. Pazmino. "Seafloor margin map helps in understanding subduction earthquakes". In: *EOS Transaction American Geophysical Union* 86.46 (2005), pp. 463–465
4. Y. Le Gonidec, G. Lamarche, and I.C. Wright. "Using sound waves to sort out seafloor sediment types". In: *Water and Atmosphere* 11 (2003)
3. Le Gonidec Y., D. Gibert et J.N. Proust, Caractérisation de la structure interne multi-échelle de réflecteurs à l'aide d'ondes réfléchies, *5^{ième} Journée d'Acoustique Sous-Marine*, Brest, 2000.
2. Le Gonidec Y. et G. Saracco, Milieux granulaires : simulations numériques et expériences en cuve acoustique, *5^{ième} Journée d'Acoustique Sous-Marine*, Brest, 2000.
1. Y. Le Gonidec. "Caractérisation d'interfaces et de milieux complexes par analyse sismique multi-échelle : expérimentation et modélisation en régime de diffusion multiple". PhD thesis. Université de Rennes 1, 2001

Chapitre de livre

Contribution à la rédaction de *Le livre blanc de l'acoustique en France en 2010*, édité par la Société Française d'Acoustique, 2010.

Cartes géophysiques

2. Collot J.-Y., Y. Le Gonidec, F. Michaud, B. Marcaillou, A. Alvarado, G. Ratzov, M. Sosson, E. Lopez, P. Silva, y el personal científico y técnico del INOCAR, Mapas del margen continental del Norte de Ecuador y del Suroeste de Colombia : Batimetría, Relieve, Reflectividad Acústica e Interpretación Geológica, publicación IOA-CVM-03-Post, 2006.
1. Collot J.-Y., F. Michaud, Y. Le Gonidec, A. Calahorrano, F. Sage, A. Alvarado, y el personal científico y técnico del INOCAR, Mapas del margen continental Centro y Sur de Ecuador : Batimetría, Relieve, Reflectividad Acústica e Interpretación Geológica, publicación IOA-CVM-04-Post, 2006.

III Communications à congrès

28. Le Gonidec Y., J. Wassermann, J. Sarout, C. Nussbaum & P. Bossart. "Microseismicity Induced in the Opalinus Clay by a Gallery Excavation in the Mont Terri Underground Rock Laboratory", *American Rock Mechanics Association*, San Francisco, USA, 2015.

27. Le Gonidec Y., J. Sarout, J. Wassermann, & C. Nussbaum. “Stress-Induced Microseismic Events during a Gallery Excavation in a Clay Formation : Spatial Distribution and Damage Mechanism.”, *American Geophysical Union*, San Francisco, USA, 2014.
26. Le Gonidec, Y., “Damage initiation and propagation assessed from stress-induced microseismic events during a mine-by test”, *Mont-Terri Technical Meeting*, Saint-Ursanne, Suisse, 2014.
25. Imbert D., Y. Le Gonidec & S. McNamara. “A numerical method for sound waves in a submerged granular medium”, *International Congress on Ultrasonics*, Singapore, 2013.
24. Wassermann, J., Y. Le Gonidec, D. Gibert, B. Kergosien, C. Nussbaum, F. Nicollin, P. Adler & P. Vazquez. “Long-term and multi-scale monitoring with passive geophysical methods”, *Mont-Terri Technical Meeting*, Saint-Ursanne, Suisse, 2013.
23. Le Gonidec Y., J. Wassermann, C. Nussbaum, D. Gibert, J. Sarout. “Micro-seismicity recorded during a gallery excavation in the Opalinus Clay of the Mont Terri URL : preliminary description of in situ damage mechanism”, *American Geophysical Union*, San Francisco, USA, 2012.
22. Le Gonidec Y., Wassermann J., Nussbaum C., Sarout J., Gibert D., Lopes F. “Geophysical monitoring of the EDZ during a gallery excavation in the Opalinus Clay of the Mont Terri URL : micro-seismicity and damage mechanism”, *5th International meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers*, Montpellier, 2012.
21. Le Gonidec Y., Wassermann J., Adler P., Delorme P., Gibert D., Kergosien B., Nicollin F., Nussbaum C., Vazquez P. “Long-term and multi-scale monitoring with passive geophysical methods : principles and measurements at the Mont Terri Underground Research Laboratory”, *5th International meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers*, Montpellier, 2012.
20. Gibert D., B. Kergosien, Y. Le Gonidec, A. Mainault, F. Nicollin, J. Sarout & J. Wassermann. “Geophysical monitoring of the EDZ during a gallery excavation in the Opalinus Clay of the Mont Terri URL : design and principles of specific in situ experimental setups”, *5th International meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers*, Montpellier, 2012.
19. Wassermann, J., Y. Le Gonidec, D. Gibert, B. Kergosien, C. Nussbaum, F. Nicollin, P. Adler, & P. Vazquez. “Long-term and multi-scale monitoring with passive geophysical methods”, *Mont-Terri Technical Meeting*, Saint-Ursanne, Suisse, 2012.
18. Le Gonidec Y., J. Wassermann, C. Nussbaum, P. Robion, C. Barnes, B. Menendez, P. Souloumiac & C. David. “Damage mechanisms during gallery excavation in Opalinus clay formation at the Mont Terri Underground Rock Laboratory (Switzerland)”, *9th Euro Conference of Rock Physics & Geomechanics*, Trondheim, Norvège, 2011.
17. Thiot J.-L., Y. Le Gonidec & B. Kergosien. “Acoustic emissions in multiscale granular structures under gravitational destabilization”, *Proceedings in International Congress on Ultrasonics*, Gdańsk, Pologne, 2011.

16. Le Gonidec Y., A. Schubnel, J. Wassermann, D. Gibert, C. Nussbaum, B. Kergosien, J. Sarout, A. Maineult, & Y. Guéguen. *4th International meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers*, Nantes, 2010.
15. Le Gonidec Y., A. Schubnel, J. Wassermann, D. Gibert, C. Nussbaum, B. Kergosien, J. Sarout, A. Maineult, & Y. Guéguen. *8th Euro Conference of Rock Physics & Geomechanics*, Ascona, Suisse, 2009.
14. Le Gonidec Y.. “Complex interfaces of granular media : multiscale effective properties and inverse problem”, *Acoustics’08 ASA-EAA-SFA*, Paris, 2008.
13. Le Gonidec Y.. “Caractérisations acoustique de surfaces rugueuses et d’interfaces granulaires”, *Seatechweek Bilan des CPER Acoustique sous-marine et Géophysique*, Brest, 2008.
12. Le Gonidec Y. et D. Gibert. “Caractérisation multi-échelle d’interfaces complexes : milieux granulaires polydispersés“, *8e Congrès Français d’Acoustique*, Tours, 2006.
11. Le Gonidec Y. et D. Gibert, Multifrequency analysis of underwater acoustic waves reflected by complex media : principles and water tank experiments, *Oceans’05 Conference*, Brest, 2005.
10. Le Gonidec Y. et D. Gibert, Réflexion d’une onde acoustique par une interface complexe analysée par une approche multifréquence, *9^{èmes} Journées d’Acoustique Physique*, Sous-marine et UltraSonore, Aix-en-Provence, 2005.
9. Le Gonidec Y., G. Lamarche & I. C. Wright. Identification of inhomogeneous substrates from EM300 raw backscatter data, *European Geophysical Union*, Nice, 2004.
8. Le Gonidec Y., & D. Gibert. A multi-scale method to characterize complex interfaces : the wavelet response, *European Geophysical Union*, Nice, 2004.
7. Wright, I. C., A. A. Rowden, Y. Le Gonidec, G. Lamarche, & T. J. Worthington. EM300 Multibeam Mapping of the Kermadec Arc : Integrated Geological, Substrate, and Biodiversity Studies of Haungaroa Volcano, *Western Pacific Geophysics Meeting*, Honolulu, Hawaii, 2004.
6. Lamarche G., S. Nodder, Y. Le Gonidec, M. Dunkin & I. Wright. Characterisation of seafloor substrates around the New Zealand continental shelf and deep ocean using EM300 and EM3000 multibeam bathymetry and seafloor reflectivity, *SeaTechWeek*, Brest, 2004.
5. Le Gonidec Y., G. Lamarche & I. C. Wright. Characterisation of Seafloor Substrates using EM300 Backscatter Strength, *Geophysical Society of New Zealand*, Wellington, 2003.
4. Le Gonidec Y., D. Gibert & J.N. Proust. Analysis of waves reflected by complex interfaces : a multiscale approach, *European Geophysical Society*, Nice, 2001.
3. Le Gonidec Y., D. Gibert et J.N. Proust. Caractérisation de la structure interne multi-échelle de réflecteurs à l’aide d’ondes réfléchies, *5^{ième} Journée d’Acoustique Sous-Marine*, Brest, 2000.

2. Le Gonidec Y. et G. Saracco. Milieux granulaires : simulations numériques et expériences en cuve acoustique, *5^{ième} Journée d'Acoustique Sous-Marine*, Brest, 2000.
1. Gibert D., Y. Le Gonidec, F. Conil and G. Saracco. Détection de perturbations en milieux hétérogènes par renversement temporel, *Réunion des Sciences de la Terre*, Paris, 2000.

IV Séminaires de laboratoires

11. Curtin University, Perth, Australie, 2013.
10. CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), Perth, Australie, 2013.
9. GEC (Laboratoire Géosciences et Environnement), Cergy, 2011.
8. ENSIETA (École Nationale Supérieure des Ingénieurs des Études et Techniques d'Armement), Brest, 2008.
7. IPR (Institut de Physique de Rennes), Rennes, 2008.
6. IRMAR (Institut de Recherche Mathématique de Rennes), Rennes, 2008.
5. LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine), Le Mans, 2007.
4. Colloque Bilans et Prospectives du GDR-Marge, CNRS, Paris, 2006.
3. LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique), Marseille, 2004.
2. LPMC (Laboratoire de Physique de la Matière Condensée), Nice, 2004.
1. LMP (Laboratoire de Mécanique Physique), Bordeaux, 2004.

Synthèse des travaux de recherche

Introduction générale

Les problématiques scientifiques qui motivent mes projets de recherche me conduisent à travailler sur différents types de systèmes complexes, contrôlés ou naturels, tels que les milieux granulaires, les fonds marins de surface et de subsurface, les massifs rocheux endommagés ou encore les systèmes volcaniques hydrothermaux. Afin de pouvoir expliquer le fonctionnement de tels systèmes géologiques et les processus mis en jeu, pour des objectifs de prédiction et de prévention par exemple, il faut pouvoir remonter à leur dynamique, c'est à dire à leur évolution spatio-temporelle. Pour cela, les méthodes acoustiques ont l'intérêt de pouvoir explorer le système, défini par un milieu de propagation complexe, et de renseigner sur ses propriétés physiques. Ceci nécessite (i) une meilleure compréhension de la propagation acoustique, contrôlée par les interactions entre l'onde et le milieu, (ii) le développement de méthodes d'analyse spécifiques pour établir une imagerie quantitative du milieu et (iii) la mise en œuvre de méthodes d'investigation *in situ* adaptées pour mieux comprendre la dynamique d'évolution du milieu. Par conséquent, l'exploitation de l'information accessible *via* l'acoustique nécessite des développements à la fois méthodologiques et expérimentaux qu'il convient d'adapter notamment dans le cas de configurations de mesures *in situ*. Une telle approche de travaux de recherche nécessite des phases de préparation et de validation préliminaires à toute phase de valorisation, en particulier en terme de publications scientifiques. La présentation de mes travaux de recherche, qui se situent dans ce contexte multi-et inter-disciplinaire, se structure selon les trois axes suivants :

- ▷ **propagation acoustique** dans des milieux granulaires immergés : en régime statique, la méthode de caractérisation par réponse en ondelettes, développée durant mes travaux de thèse, est mise au point expérimentalement sur des interfaces granulaires. En régime de déstabilisation quasi-statique, les grains se réorganisent : ces réarrangements dynamiques induisent des émissions acoustiques étudiées comme précurseurs et signatures du régime de l'avalanche. Une nouvelle méthode de simulation numérique de propagation d'ondes acoustiques dans de tels milieux est développée pour prendre en compte le couplage entre les grains et la matrice fluide.
- ▷ **imagerie acoustique** de milieux granulaires naturels, à savoir les fonds marins : la méthode de caractérisation par réponse en ondelettes est étendue au cas de données sismiques haute résolution pour identifier de nouveaux attributs sismiques multiéchelles de réflecteurs de subsurface. Le développement de cette méthode permet notamment de corriger les perturbations induites par la bande de fréquence limitée de la source sismique, nécessaire à la fusion de données sismiques multifréquences, et est étendu à la caractérisation multiéchelle de structures océanographiques.
- ▷ **monitoring acoustique** d'un massif rocheux soumis à des redistributions de contraintes géomécaniques induites par l'excavation d'une galerie souterraine : le suivi spatio-temporel de la zone endommagée est assuré par des méthodes d'acoustique active et passive pour caractériser le milieu de propagation en terme d'anisotropie du champ de vitesse notamment et la dynamique du milieu, à savoir l'activité microsismique en terme de localisation et de mécanisme des émissions acoustiques.

I Propagation acoustique en milieux granulaires immergés : méthodes expérimentales et simulation

I.1 Caractérisation acoustique d'un réflecteur granulaire par réponse en ondelettes

Dans le cadre de mes travaux de thèse, j'ai mis au point une méthode acoustique d'analyse d'interfaces complexes, appelée *réponse en ondelettes*, et démontré le potentiel de la méthode pour caractériser la géométrie de réflecteurs minces ou d'interfaces granulaires par des expérimentations en cuve acoustique. Ces travaux ont donné lieu à deux premiers articles sur le sujet, Le Gonidec *et al.* [56] et Le Gonidec *et al.* [53], publiés dans *Journal of Geophysical Research* et *Ultrasonics*, respectivement, afin de les diffuser auprès des communautés acoustique et géophysique. Dans la continuité de ces travaux, cette méthode acoustique multi-échelle a été valorisée à travers d'autres publications qui font l'objet de cette synthèse. Il est donc fait référence à la réponse en ondelettes à plusieurs reprises, dans cette section sur la propagation acoustique (Section I) mais également dans la section suivante où de récentes extensions portent sur l'imagerie sismique très haute résolution (Section II). C'est pourquoi les principes théoriques et expérimentaux de la méthode sont introduits brièvement maintenant pour permettre une meilleure compréhension des nouveaux développements présentés par la suite.

I.1.1 Principes théoriques de la réponse en ondelettes

Pour identifier des discontinuités contenues dans un signal complexe, la transformée en ondelettes continue présente des propriétés d'analyse multi-échelle s'adaptant à différentes échelles d'observation (Holschneider [34], Mallat and Hwang [64], Moreau *et al.* [70]). Considérons par exemple un profil de vitesse $v(z)$ d'un milieu 1D en fonction de la profondeur z , et une famille d'ondelettes $\mathcal{D}_a\xi(z) = a^{-1}\xi(z/a)$ définies à partir de l'ondelette analysante $\xi(z)$ dilatée d'un facteur $a \in \mathbb{R}^+$. Dans ces travaux, le choix s'est porté sur une ondelette de type dérivée de Gaussienne, $\xi_n(z) = \frac{d^n e^{-z^2}}{dz^n}$, où n est l'ordre de dérivation. La transformée en ondelettes du profil v avec une ondelette analysante réelle ξ_n s'exprime avec l'opérateur de convolution $*$ par :

$$\mathcal{W}[\xi_n, v](z, a) = \mathcal{D}_a\xi_n(z) * v(z) \quad (1a)$$

$$= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi_n\left(\frac{z-b}{a}\right) v(z) dz \quad (1b)$$

Le nombre N d'extrema de \mathcal{W} et l'évolution de l'amplitude d'un extremum en fonction de la dilatation a , appelée *ligne d'extrema*, renseignent sur la morphologie du profil $v(z)$ (Mallat and Hwang [64]). Par exemple, si $v(z)$ est une discontinuité de Dirac $\delta(z)$ (réflecteur d'épaisseur nulle), sa transformée en ondelettes possède N extrema et la ligne d'extrema est une droite de pente $\alpha=-1$; des discontinuité de type Heaviside $H(z) = \int_{-\infty}^z \delta(u) du$ (dioptre) et Rampe $G(z) = \int_{-\infty}^z H(u) du$ (gradient) se caractérisent respectivement par $N-1$ et $N-2$

extrema et des pentes $\alpha=0$ et -1 .

Dans le cas où les propriétés du milieu ne sont pas connues *a priori*, une extension naturelle de la transformée en ondelettes consiste à sonder le milieu à différentes échelles d'observation par la famille d'ondelettes utilisées comme sources acoustiques. Une onde acoustique se propageant dans un milieu caractérisé par son profil d'impédance acoustique $\gamma(z) = v(z)\rho(z)$, où $\rho(z)$ est le profil de densité, est réfléchié par tout contraste entre $\gamma(z)$ et $\gamma(z + dz)$ avec une amplitude de réflectivité $r(z) = \frac{1}{2\gamma(z)} \frac{d\gamma(z)}{dz}$. La réponse en ondelettes du milieu consiste donc à remplacer l'opérateur de convolution $*$ de l'équation (1) par l'opérateur de propagation noté et défini par $\otimes = \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2(z)} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$: les signaux réfléchis constituent la réponse en ondelettes du milieu définie par Le Gonidec *et al.* [56] :

$$\mathcal{R}[\xi_n, \gamma](t, a) = \mathcal{D}_a \xi_n(t) \otimes \gamma(t). \quad (2)$$

Le temps de propagation t de l'onde réfléchié est lié à la vitesse v par $t(z) = \int_{z_s}^z v(\xi)^{-1} d\xi + \int_{z_r}^z v(\xi)^{-1} d\xi$, avec z_s et z_r les positions de la source et du récepteur, respectivement. Nous considérons $z_s = z_r$, c'est à dire que la source et le récepteur ont des positions confondues. Si les réflexions multiples peuvent être négligées (approximation de Born), Gray and Bleistein [29] montrent que l'émission d'un Dirac sur le réflecteur conduit à une onde réfléchié égale à la réflectivité $r(t) = \frac{1}{2} \frac{d \ln(\gamma(t))}{dt}$ exprimée dans le domaine temporel. De plus, si la densité ρ peut être considérée comme constante, la réflectivité est directement reliée à la dérivée du profil de vitesse par rapport au temps, i.e. $r(t) = \frac{1}{4} \frac{dv(z(t))}{dt}$. Dans ce contexte, nous démontrons que la réponse en ondelettes du profil d'impédance acoustique γ , qui s'exprime dans le domaine temporel par une convolution entre $\mathcal{D}_a \xi_n(t)$ et la fonction de Green $r(t)$ du milieu, est équivalente à la transformée en ondelettes exprimée dans le domaine spatial :

$$\mathcal{R}[\xi_n, \gamma](t, a) = \mathcal{D}_a \xi_n(t) * r(t) \quad (3a)$$

$$\equiv \mathcal{W}[\xi_{n+1}, \gamma](z, a). \quad (3b)$$

Il en résulte que les propriétés de la transformée en ondelettes \mathcal{W} peuvent s'appliquer directement à la réponse en ondelettes \mathcal{R} . En particulier, les lignes d'extrema constituent un support compact de l'information multiéchelle de la géométrie complexe du réflecteur.

Le cadre théorique de la réponse en ondelettes étant bien établi, des approches numériques par différences finies ont permis d'illustrer le potentiel de la méthode sur des discontinuités synthétiques (Figure 1) : aux basses fréquences, la réponse en ondelettes présente une structure conique globale qui se subdivise aux plus hautes fréquences en sous-structures pointant chacune sur les discontinuités composant le réflecteur. Les lignes d'extrema associées ne sont pas linéaires et rendent compte de la transition entre structure à grande échelle et structure interne de la discontinuité.

I.1.2 Réalisation expérimentale de la réponse en ondelettes

Principe expérimental - Le développement expérimental de la méthode de caractérisation d'un réflecteur complexe par réponse en ondelettes a nécessité la mise au point d'un

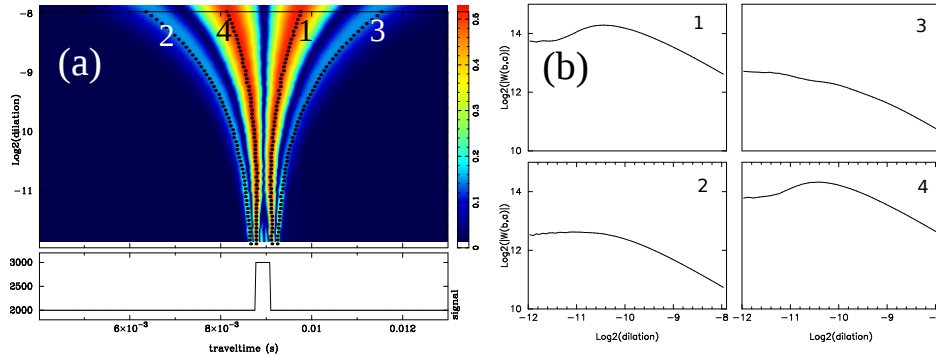


FIGURE 1 – (a) Réponse en ondelettes d'un créneau et (b) ligne d'extrema en diagramme log-log de l'amplitude en fonction de la dilatation (modifié de Le Gonidec et al. [56]).

protocole adapté, notamment en ce qui concerne la famille d'ondelettes sources. En effet, il s'agit de pouvoir émettre ces signaux particuliers afin de sonder le milieu à plusieurs échelles d'analyse. Avec des perspectives initiales d'application à la caractérisation des fonds marins, la configuration d'acquisition est celle de la sismique réflexion où le couple émetteur-récepteur est placé au-dessus du réflecteur.

La première étape nécessite de construire la famille d'ondelettes source à partir de l'ondelette analysante définie comme une dérivée quatrième de Gaussienne $n = 4$ (Figure 2a). L'utilisation de plusieurs couples émetteur-récepteur, constitués de transducteurs piézo-électriques de différentes fréquences centrales, permet de construire des ondelettes de fréquences comprises entre 0.15 et 1.2 MHz (Figure 2b).

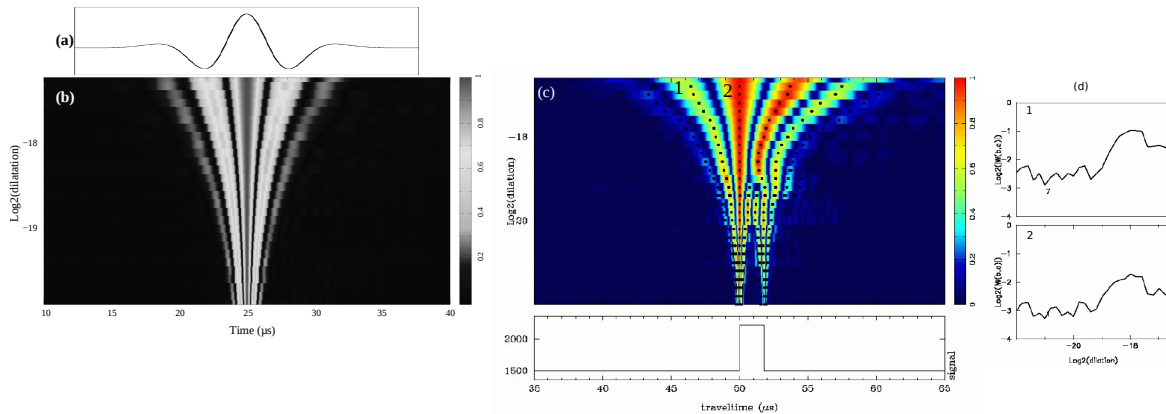


FIGURE 2 – (a) Ondelette analysante (dérivée quatrième de Gaussienne) considérée pour construire la famille d'ondelettes (b) entre 0.15 et 1.2 MHz. (c) Réponse en ondelettes expérimentale d'une discontinuité de type créneau et (d) lignes d'extrema associées (modifiées de Le Gonidec et al. [56] et Le Gonidec and Gibert [54]).

Cette famille d'ondelettes est dans un second temps utilisée pour le sondage multifréquence d'un réflecteur complexe, comme illustré pour un créneau constitué d'une plaque homogène d'épaisseur finie : le résultat est une réponse en ondelettes et des lignes d'extrema (Figures 2c et d) en accord avec les approches théoriques et synthétique introduite ci-dessus par différences finies (Figure 1).

Réponse en ondelettes d'un milieu granulaire statique - Dans un milieu granulaire, une onde acoustique peut interagir de manière complexe avec les grains, donnant lieu à des processus de diffusion multiple par exemple (Page *et al.* [75]) lorsque la longueur d'onde acoustique λ est du même ordre de grandeur que la taille D des diffuseurs. Durant ma thèse, j'ai développé un protocole expérimental de la réponse en ondelettes sur des billes de verre monodisperses immergées, pour des valeurs de λ/D comprises entre 0.3 et 15. La réponse en ondelettes (Figure 3a) et les lignes d'extrema (Figure 3b) mettent en effet en évidence l'existence de différents processus physiques caractéristiques : un régime de simple diffusion pour $\lambda/D > 7$, où la réponse du milieu granulaire est celle d'un milieu homogène équivalent, et une transition vers la diffusion multiple localisée à $\lambda/D = 2$ (Figure 3b).

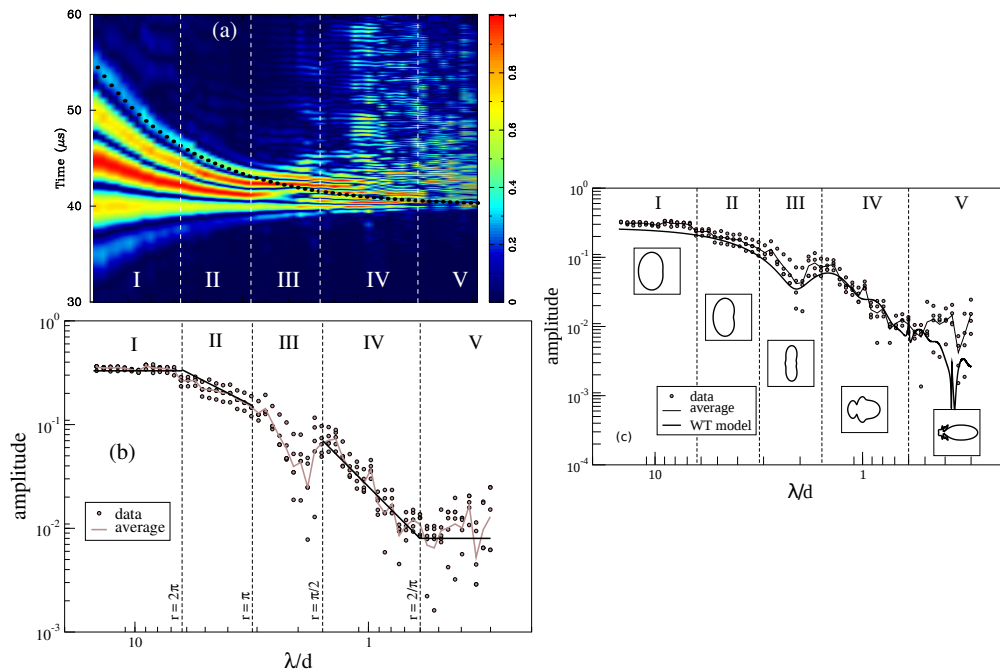


FIGURE 3 – (a) Réponse en ondelettes d'un milieu granulaire et (b) ligne d'extrema moyenne (ligne continue) où sont identifiés cinq régimes spécifiques d'interaction entre l'onde acoustique et le milieu granulaire. (c) Résultat du modèle de milieu effectif dynamique (Waterman and Truell [85]) et lignes d'extrema expérimentales, avec illustrations des diagrammes de rayonnement acoustique d'un diffuseur pour chaque domaine de fréquence (extraites de Le Gonidec and Gibert [55]).

Des modèles de milieux effectifs sont mis en œuvre pour associer les données expérimentales à des résultats théoriques existants. Un bon accord est observé avec le modèle de Kuster and Toksöz [50], mais restreint à la gamme de fréquences définies par $\lambda/D > 7$ où la réponse acoustique du milieu granulaire est indépendante de la fréquence. Le modèle de Waterman and Truell [85] rend compte d'un comportement effectif dynamique du milieu et est considéré pour couvrir les autres domaines : ce modèle permet de caractériser les propriétés du milieu par un nombre d'onde effectif complexe, k^* :

$$\left(\frac{k^*}{k_m}\right)^2 = \left(1 + \frac{2\pi n f(0)}{k_m^2}\right)^2 - \left(\frac{2\pi n f(\pi)}{k_m^2}\right)^2, \quad (4)$$

où k_m est le nombre d'onde de la matrice, n la densité de grains et f la fonction de forme d'un grain prise dans la direction de propagation (π) et dans la direction opposée (0). Nous mettons ainsi en évidence un très bon accord entre les mesures expérimentales par réponse en ondelettes et le modèle de milieu effectif (Figure 3c). Après ma thèse, j'ai valorisé ces résultats à travers deux publications, dont l'article Le Gonidec and Gibert [55] joint en annexe où ces analyses par milieux effectifs sont détaillées.

Suite à ces travaux, j'ai amélioré le protocole expérimental de la réponse en ondelettes, notamment la famille d'ondelettes sources en optimisant leur code de génération par recuit simulé. Les fréquences d'ondelettes maintenant disponibles sont comprises entre 0.1 et 4 MHz. D'autre part, le couple émetteur-récepteur est maintenant remplacé par l'utilisation d'un unique transducteur piézo-électrique fonctionnant en émission puis en réception, ce qui n'était pas possible dans les expériences menées jusqu'alors où deux transducteurs étaient nécessaires. Plusieurs séries d'expériences complémentaires ont été menées ensuite sur des milieux granulaires polydisperses mais également sur des interfaces granulaires, des surfaces rugueuses ou encore des milieux diphasiques de bulles d'air. Ces travaux ont donné lieu à des collaborations avec l'IRMAR mais n'étant pas encore valorisés en terme de publication, ils ne sont pas décrits dans cette synthèse.

Réponse en ondelettes d'un milieu granulaire quasi-statique - Les travaux présentés jusqu'à présent portent sur des milieux granulaires statiques, pour lesquels la méthode de caractérisation par réponse en ondelettes a pu être mise au point et a déjà permis de mettre en évidence le potentiel de la méthode pour caractériser un milieu granulaire. Son extension au cas de milieux granulaires soumis à une déstabilisation gravitaire a été abordée dans le cadre du projet ANR STABINGRAM afin d'identifier la zone de fluidisation de la surface du milieu granulaire. La réalisation de ces expérimentations sur des avalanches granulaires, dont la particularité, et par là même la difficulté a été de les concevoir en conditions immergées, a requis des contraintes spécifiques qui ont nécessité d'importantes adaptations à la fois du dispositif (Figure 4), du protocole de mesure, et des différents codes d'acquisition.



FIGURE 4 – *Dispositif expérimental de réflexion/rétrodiffusion acoustique durant la déstabilisation de milieux granulaires immergés.*

Là encore, des résultats prometteurs mais non valorisés actuellement en terme de publication scientifique font l'objet de perspectives dans la continuité de ces travaux. En effet, plusieurs verrous à cette valorisation ont déjà pu être identifiés et pourront être levés grâce aux récentes améliorations apportées notamment au dispositif expérimental.

Ces difficultés expérimentales ont conduit à réorienter les objectifs du projet vers l'exploitation de l'acoustique passive par mesures expérimentales d'émissions acoustiques lors la déstabilisation, décrite dans la section suivante. Dans le même temps, nous avons obtenu un financement de la Région Bretagne pour une thèse en co-encadrement avec l'IPR sur le développement d'une simulation de propagation d'onde acoustique dans un milieu granulaire immergé parfaitement intégrée à cette problématique (Section I.3).

I.2 Caractérisation du régime d'instabilité granulaire par analyse des émissions acoustiques

Lorsqu'un empilement granulaire est progressivement incliné, des réarrangements se produisent, ainsi que le montrent des analyses d'images de la surface dont la proportion de réarrangement est analysée (De Richter *et al.* [18], Nerone *et al.* [73]). Par contre, les phénomènes de proche surface ou de volume ne sont pas directement accessibles. Dans des milieux granulaires secs, l'onde acoustique se propage préférentiellement à travers le réseau de contacts entre grains : elle est par conséquent très sensible aux réarrangements comme le montrent de récentes méthodes acoustiques basées sur des processus non-linéaires (Duranteau *et al.* [20], Tournat *et al.* [82], Zaitsev *et al.* [88]). Dans le cas immergé, où les pores du milieu sont saturés d'eau par exemple, l'onde acoustique se propage préférentiellement dans la matrice et perd cette sensibilité aux réarrangements de contacts. Cependant, ces réarrangements sont les signes de réorganisations du milieu durant la déstabilisation et peuvent être sources d'émissions acoustiques comme l'ont récemment montré Gibiat *et al.* [25]. C'est dans ce contexte de l'acoustique passive que nous nous sommes intéressés à la caractérisation du régime de déstabilisation granulaire.

Nous avons mis en place un dispositif expérimental d'avalanches de billes de verre, dispositif pouvant être totalement immergé (Thirot *et al.* [80]). Des capteurs piézo-électriques, placés dans le milieu granulaire, enregistrent le bruit ambiant et permet de détecter notamment les potentielles émissions acoustiques induites par les réarrangements de grains. Différents milieux granulaires monodisperses sont étudiés, en terme de granularité des billes de verre (diamètres 0.3, 3 et 8 mm) et de viscosité de la matrice fluide (air, eau). Pour ces différentes configurations expérimentales, des enregistrements du bruit acoustique ambiant sont enregistrés au cours de la déstabilisation (Figure 5).

Nous mettons en évidence une nette dépendance du bruit acoustique avec les propriétés du milieu. A sec, des pics d'amplitude du bruit apparaissent de manière régulière à l'approche de l'angle d'avalanche ($\sim 28^\circ$) et rendent compte d'émissions acoustiques engendrées par des réorganisations interne au milieu (Figures 5a-b). Cette observation est également faite dans le cas des billes de 8 mm de diamètre immergées (Figure 5e). En revanche, la déstabilisation de billes plus petites (diamètres 0.3 et 3 mm) immergées ne provoque pas d'émissions acoustiques

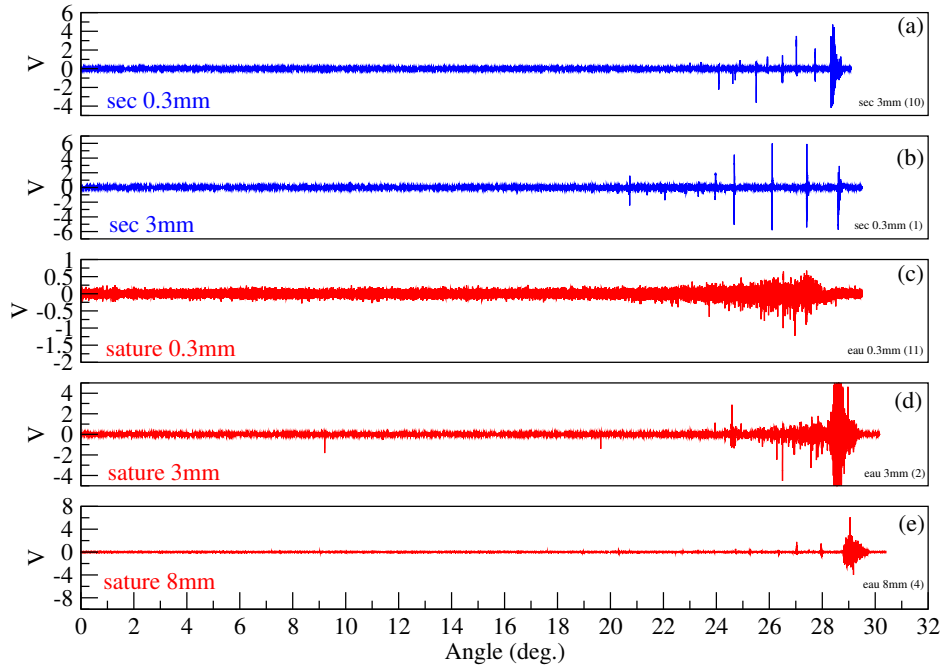


FIGURE 5 – Bruits acoustiques ambiants enregistrés durant la déstabilisation de milieux granulaires secs (bleu) et immergés (rouge), pour des billes de verre de diamètre (a) 3 mm et (b) 0.3 mm à sec, et (c) 0.3 mm, (d) 3 mm et (e) 8 mm en immergé (modifié de Thirot et al. [80]).

notables, c'est à dire que leur rapport signal-sur-bruit est faible (Figures 5c-d) : à l'approche de l'angle d'avalanche, le milieu évolue de manière continue vers un état instable caractérisé par une augmentation de son activité acoustique.

Afin d'identifier les différents régimes observés, nous replaçons nos résultats d'analyse des émissions acoustiques dans un diagramme $r - S_t$ défini par Courrech Du Pont *et al.* [15], où r est lié au rapport des densités ρ_s des grains et ρ_f de la matrice par $r = \sqrt{\rho_s/\rho_f}$, et S_t le nombre de Stokes lié à l'inertie du grain par rapport aux effets visqueux de la matrice fluide. Nous pouvons réécrire S_t sous la forme :

$$S_t = \frac{\sqrt{3}}{18\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{p_a \rho_s}}{\mu} \quad (5)$$

où p_a est le poids apparent d'un grain immergé dans la matrice fluide de viscosité dynamique²⁴ μ . Dans ce diagramme, nous mettons ainsi en évidence la dépendance entre le bruit acoustique généré par la déstabilisation et le régime de l'écoulement (Figure 6).

Pour un faible nombre de Stokes $S_t \simeq 1$ étudié avec des billes de diamètre $d=0.3$ mm dans l'eau (c), l'écoulement granulaire suit le régime visqueux identifié par Courrech Du Pont *et al.* [15] : les auteurs mettent en évidence une durée d'avalanche $T \propto d^{-2}$ très élevée. Dans ce régime, nous observons un niveau de bruit acoustique ambiant qui augmente avec l'angle d'inclinaison du milieu : la déstabilisation évolue de manière continue jusqu'à l'avalanche dont la durée du processus est très étendue dans le temps. Dans ce cas, l'énergie cinétique

24. viscosité dynamiques : $\mu_{\text{eau}} \simeq 10^{-3}\text{Pa.s}$ et $\mu_{\text{air}} \simeq 10^{-5}\text{Pa.s}$

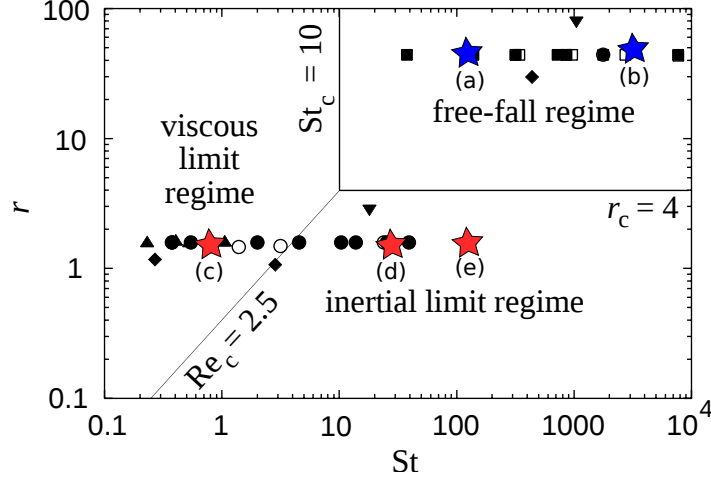


FIGURE 6 – Emplacement des résultats de mesures expérimentales dans le diagramme $r - S_t$ établi par Courrech Du Pont *et al.* [15] où r est lié au rapport de densité des grains et de la matrice et S_t est le nombre de Stokes : billes de diamètre (a) 0.3 et (b) 3 mm dans l'air (bleu), et de (c) 0.3, (d) 3 mm et (e) 8 mm dans l'eau (rouge) (modifié de Thirot *et al.* [80]).

des grains est dissipée par le fluide par une succession de collisions inélastiques.

Pour des nombres de Stokes plus élevés, $S_t \simeq 30$ et $S_t \simeq 120$ étudiés respectivement avec des billes de diamètre 3 et 8 mm dans l'eau (d,e), les avalanches suivent un régime inertiel caractérisés par des durées $T \propto d^{-1/2}$ (Courrech Du Pont *et al.* [15]) plus faibles que pour un régime visqueux. Cette analyse se trouve également en cohérence avec les observations extraites du bruit acoustique où l'avalanche se caractérise par un instant de déclenchement et une durée bien déterminés. Ces déstabilisations sont caractérisées par l'identification d'émissions acoustiques qui indiquent un écoulement moins continu qu'en régime visqueux : l'énergie cinétique des grains n'est pas totalement dissipée par le fluide durant les collisions et une partie est dégagée sous forme d'énergie élastique.

Pour des billes de verre non immergées, les expériences menées avec $d=0.3$ et 3 mm, respectivement, correspondent au régime de chute libre avec $r \simeq 50$ et $S_t \simeq 120$ et $S_t \simeq 3500$ où l'influence du fluide est négligeable et la durée de l'avalanche est indépendante du diamètre des grains $T \propto d^0$ (Courrech Du Pont *et al.* [15]). Dans les mesures de bruit acoustique, nous mettons clairement en évidence l'existence d'émissions acoustiques qui constituent la principale libération d'énergie lors des collisions, avec une dépendance de leur fréquence de récurrence avec la taille des grains (Thirot *et al.* [80]).

Ces résultats laissent supposer qu'il existe une corrélation entre le nombre de Stokes S_t et la récurrence des émissions acoustiques : l'analyse du bruit acoustique peut donc renseigner sur le régime et la durée de l'écoulement. Pour cela, des études complémentaires restent nécessaires pour observer plus en détails les transitions entre les différents régime d'avalanche.

Dans le cas des billes immergées, l'effet de la matrice fluide n'est pas négligeable sur la propagation non seulement des émissions acoustiques mais des ondes acoustiques en général. Pour mieux comprendre ces effets, l'approche numérique est un outil complémentaire qui fait l'objet de la section suivante (Section I.3).

I.3 Simulation de propagation d'une onde acoustique dans un milieu granulaire immergé

Comme nous l'avons introduit dans la section précédente, la propagation d'une onde acoustique dans un milieu granulaire immergé se fait préférentiellement à travers la matrice fluide dans laquelle la mobilité des grains permet de générer les émissions acoustiques et influe sur la propagation de l'onde. Pour mieux comprendre l'interaction entre l'onde et les grains immergés, les travaux expérimentaux précédents ont été complétés par la mise au point d'une méthode de simulation de propagation d'onde dans un milieu granulaire immergé. Cette simulation a fait l'objet des travaux de thèse de David Imbert qui ont permis d'implémenter pour la première fois, *via* la méthode des domaines fictifs (Glowinski and Kuznetsov [26]) décrite ci-dessous, le couplage onde acoustique-grain (Imbert [37], Imbert and McNamara [38], Imbert *et al.* [39]). Le cadre général, théorique et numérique, de la simulation est présenté dans un premier temps, puis appliqué au cas d'un grain où les résultats sont comparés à des résultats analytiques existants, avant d'être étendu au cas d'une suspension granulaire réaliste constituée de plusieurs centaines de grains. L'article de référence de ces travaux réalisés par Imbert *et al.* [39] est inséré en annexe.

I.3.1 Méthode des domaines fictifs

Lorsqu'une onde acoustique se propage dans un milieu granulaire immergé, elle est susceptible de mobiliser les grains, considérés ici comme des sphères rigides incompressibles. Les méthodes de simulation actuelles, par différences finies et éléments finis notamment, ne permettent pas de prendre en considération ce couplage entre l'onde et les grains. Pour faire face à cette limitation, nous avons introduit la méthode des domaines fictifs basée sur les multiplicateurs de Lagrange distribués (Glowinski and Kuznetsov [26], Glowinski *et al.* [27]). L'originalité de cette approche consiste à faire intervenir deux maillages d'éléments finis indépendants, l'un pour les k grains (domaine $G = \cup G_k$) et l'autre pour le fluide (domaine $\Omega \setminus G$), permettant une méthode unifiée de simulation dans le domaine global Ω .

Dans le fluide, supposé parfait, les champs de pression p et de vitesse \mathbf{u} sont reliés par la formulation mixte de l'équation des ondes acoustiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = \mathbf{0} \\ \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = \mathbf{0} \\ \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

D'autre part, les grains étant mobiles, leurs déplacements répondent au principe fondamental de la dynamique (PFD) qui s'exprime, pour le grain k de masse m_k animé du vecteur vitesse \mathbf{U}_k , par :

$$m_k \frac{d\mathbf{U}_k}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i^{\text{ext}} \quad (8)$$

où le second membre est la somme des forces extérieures qui s'appliquent au grain k . C'est ici que s'exprime le couplage entre le grain et l'onde acoustique : l'onde applique sur la frontière

∂G_k du grain k une force hydrodynamique $-\int_{\partial G_k} p \mathbf{n}_k d\ell$, avec \mathbf{n}_k le vecteur sortant de la frontière.

L'équation d'onde et l'équation discrète du PFD sont finalement reliées en considérant la continuité de la normale à \mathbf{u} au passage de ∂G_k qui conduit à considérer la condition de saut $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_k = \mathbf{U}_k \cdot \mathbf{n}_k$. Nous établissons l'équation combinée du mouvement (valable sur $\Omega \setminus G$) à partir des formulations faibles de l'équation aux dérivées partielles (Eq. 6, valable sur $\Omega \setminus G$) et du PDF (Eq. 8, valable sur G). L'extension à l'ensemble du domaine Ω se fait *via* la méthode des domaines fictifs, les contraintes au niveau des frontières de grains ∂G étant prises en compte par les multiplicateurs de Lagrange $\lambda_{\partial G}$ et sur le domaine G des grains par les multiplicateurs de Lagrange distribués λ_G . En imposant que l'onde ne se propage pas dans les grains dans lesquels est introduite la contrainte de corps rigide $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ (Glowinski *et al.* [27]), nous aboutissons finalement au système dont la résolution permet de déterminer les champs de vitesse \mathbf{u} et de pression p dans Ω et la vitesse \mathbf{U}_k du grain k [37–39] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega} \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \mathbf{v} \, d\mathbf{x} - \int_{\Omega} p \nabla \cdot \mathbf{v} \, d\mathbf{x} + \sum_k \left((\rho - \rho_0) V_k \frac{d\mathbf{U}_k}{dt} \cdot \mathbf{V} - \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{V} \right) \\ \quad + \int_{\partial G} \lambda_{\partial G} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) \, d\ell + \int_G \lambda_G (\nabla \cdot \mathbf{v}) \, d\mathbf{x} = 0 \quad (9) \\ \int_{\Omega} \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} q \, d\mathbf{x} - \int_{\Omega} \mathbf{u} \nabla q \, d\mathbf{x} = 0 \quad (10) \\ \int_{\partial G} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) \mu_{\partial G} \, d\ell = 0 \quad (11) \\ \int_G (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mu_G \, d\mathbf{x} = 0 \quad (12) \end{array} \right.$$

Pour l'implémentation numérique de la méthode, le système précédent est discrétisé à la fois en espace par la méthode des éléments finis et en temps par différences finies. La discrétisation spatiale est structurée en deux maillages réguliers différents, générés et gérés de manière indépendante par le logiciel FreeFEM++ (Hecht [30]) : le premier triangularise le domaine fixe complet Ω alors que le second est attaché au domaine G des grains et par conséquent libre de suivre le déplacement des grains au cours du temps (Imbert [37]).

1.3.2 Validation analytique de la méthode numérique

Une première approche consiste à tester le modèle numérique pour le cas d'une onde plane monochromatique incidente sur un grain isolé fixe : il s'agit d'un cas simple pour lequel existent les résultats analytiques des champs de pression p et de vitesse \mathbf{u} . La solution analytique du champ total de vitesse est déduite du champ de pression par la relation $\mathbf{u} = \frac{-i}{\omega c_0} \nabla p$: le champ total de pression est $p = p_i + p_d$, avec p_i le champ incident sur le grain et p_d le champ diffusé par le grain, déterminés respectivement à partir des fonctions de Hankel et de Bessel. Le résultat est en bon accord avec le champ simulé pour un choix bien adapté d'élément fini mixte, en l'occurrence l'élément $P_1 - P_0$ supporté par FreeFEM++.

Une seconde approche porte sur le cas d'un grain mobile oscillant librement qui induit une variation du champ de pression dans la matrice fluide environnante : le couplage entre

dynamique du grain et onde acoustique est ainsi abordé. Le cas de deux grains oscillants en champ proche est également étudié pour analyser l'interaction entre les champs de pression et le déplacement des grains. Pour ces deux cas, l'étude concerne l'échange d'énergie entre la matrice fluide et le/les grains, l'énergie totale du système étant $E_t = E_a + E_m$. L'énergie acoustique E_a est la somme de l'énergie potentielle liée à p et de l'énergie cinétique liée à \mathbf{u} : $E_a = \int_{\Omega} \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} p^2 \, d\mathbf{x} + \int_{\Omega} \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{u}^2 \, d\mathbf{x}$. L'énergie mécanique E_m est la somme de l'énergie cinétique liée à la vitesse du grain et de l'énergie potentielle liée à la force de rappel de l'oscillation du grain par rapport à sa position d'équilibre. Le transfert d'énergie entre la matrice et le grain rend compte d'une bonne conservation de E_t au cours des simulations.

Enfin, une solution analytique est proposée pour traiter le cas d'un grain mobile oscillant soumis à une onde plane incidente. Cette approche met en évidence l'effet de la mobilité du grain qui, par rapport au cas initial d'un grain fixe, tend à la fois à diminuer l'amplitude moyenne de l'onde réfléchie par le grain et à augmenter l'énergie du grain qui se met à osciller au passage de l'onde acoustique.

1.3.3 Expériences numériques

Les étapes successives de développements à la fois numériques et analytiques précédents ont permis d'étendre l'étude au cas plus complexe de suspensions de grains mobiles pour lesquelles les solutions analytiques ne sont actuellement pas déterminées. L'expérience numérique décrite ci-dessous a été motivée par les développements méthodologiques et expérimentaux de caractérisation de milieux granulaires par réponse en ondelettes (Section I.1). Dans ce contexte expérimental, la source et le récepteur sont confondus, situés au-dessus du milieu. Le signal émis est une impulsion de type dérivée de Gaussienne, de longueur d'onde λ . La suspension granulaire est composée de 400 disques de verre de diamètre $D=1$ mm immergés dans l'eau avec une fraction volumique de 44 %. Pour le moment, l'expérience numérique ne porte que sur une fréquence unique telle que $\lambda/D > 7$, c'est à dire la gamme fréquentielle identifiée expérimentalement par réponse en ondelettes comme étant associée à un régime de diffusion simple (Figure 3) : la fréquence du signal source est choisie à 150 kHz ($\lambda/D = 10$) afin de pouvoir négliger les phénomènes de diffusion multiple de l'onde acoustique par le milieu. La méthode de simulation mise au point permet de déterminer à la fois les champs de pression et de vitesse acoustiques au sein de la suspension, ainsi que le déplacement et l'accélération de chaque grain (Figure 7).

Il est intéressant d'observer le front d'onde cohérent qui domine bien dans le cas où le milieu granulaire est assimilable à un milieu homogène équivalent (régime des grandes longueurs d'onde). A partir de telles simulations, il est possible de déterminer la réponse en ondelettes de la suspension et d'en extraire les lignes d'extrema qui renseignent sur les propriétés physiques du milieu, résultats prometteurs pour mieux comprendre les observations expérimentales de sondage acoustiques multiéchelles.

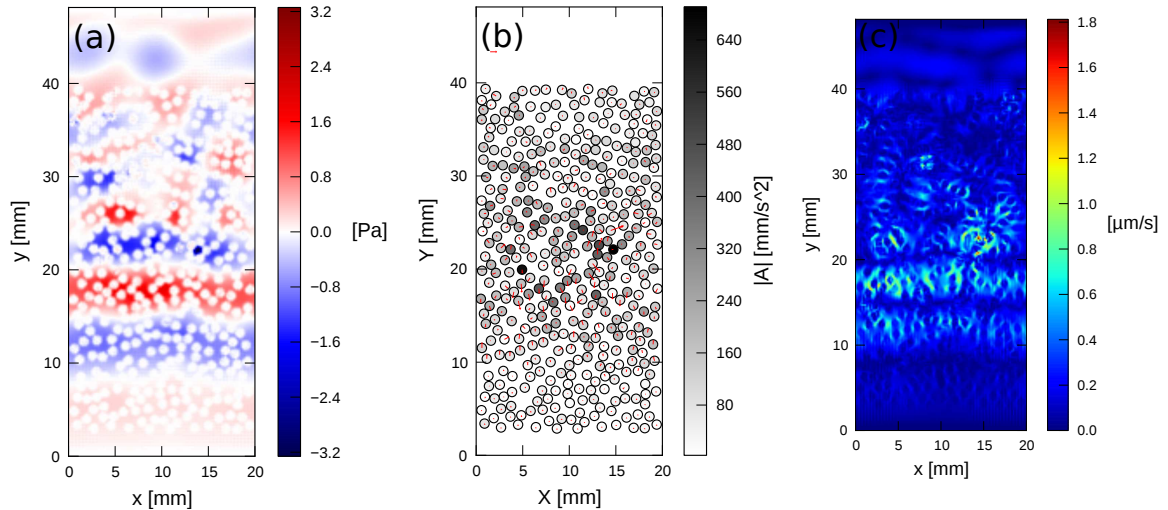


FIGURE 7 – Simulation par méthode des domaines fictifs de la propagation d’une ondelette (fréquence 150 kHz) dans une suspension de grains (diamètre 1 mm, fraction volumique 44 %) immergés dans l’eau : (a) champ de pression, (b) accélération et vitesse et (c) module du champ de vitesse (modifié de la Figure 7.6 de la thèse de D. Imbert [37]).

BILAN DE CES TRAVAUX EN QUELQUES POINTS

- ▷ Développements d’une méthode acoustique de caractérisation multiéchelle d’interfaces complexes : la *réponse en ondelettes* ;
- ▷ Expérimentations de la réponse en ondelettes pour étudier la réflectivité acoustique d’interfaces complexes : milieux granulaires, interfaces rugueuses et granulaires ;
- ▷ Caractérisation du régime d’avalanche d’un milieu granulaire soumis à une déstabilisation gravitaire : détection d’émissions acoustiques induites ;
- ▷ Développement d’un nouveau code de simulation de propagation d’onde acoustique dans un milieu granulaire immergé : couplage entre l’onde et les grains ;
- ▷ Perspectives de travaux de recherche de valorisation.

- ▷ Animation d’un projet ANR comme responsable d’un laboratoire partenaire, organisation de réunions de travail entre partenaires ;
- ▷ Collaborations nationales, notamment avec l’IPR ;
- ▷ Encadrement de travaux de thèse et de stages de Master ;
- ▷ Publications de rang A.

II Imagerie sismique de réflecteurs immergés : subsurface et surface sédimentaires, structures océanographiques

II.1 Subsurface : développements méthodologiques de sismique haute résolution basés sur la réponse en ondelettes

Initialement, la méthode acoustique d'analyse multiéchelle de réflecteurs complexes par réponse en ondelettes a été développée théoriquement (Section I.1.1) puis expérimentalement en laboratoire (Section I.1.2) : les objectifs étaient motivés par de potentielles applications à l'imagerie sismique de réflecteurs géologiques de subsurface. C'est justement à travers une collaboration avec l'équipe de Géosciences Marines de l'IFREMER, et en particulier la thèse de Stéphane Ker [41], qu'une première application se développe depuis quelques années : étendre la réponse en ondelettes à l'exploitation de sources sismiques haute résolution afin d'imager la structure interne d'un réflecteur sismique complexe. Pour cela, la réponse en ondelettes est exploitée d'une part comme nouvel attribut sismique multiéchelle et d'autre part comme méthode de correction des effets de sources sismiques à support fréquentiel limité (Section II.1.2) avec pour objectif la fusion de données sismiques multifréquences (Section II.1.4). Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications, dont l'article de Ker *et al.* [44] concernant l'optimisation de la méthode, inséré en annexe.

II.1.1 Introduction de nouveaux attributs sismiques multiéchelles

Porté par la trace sismique, un attribut sismique est une caractéristique indirecte d'un réflecteur (Chopra and Marfurt [13]), dont la variabilité, en espace et/ou en temps, peut être exploitée pour l'interprétation et la quantification de grandeurs telles que la géométrie du réflecteur sismique. Dans le cas de réflecteurs géologiques, cette géométrie est définie à partir d'une distribution complexe de propriétés pétrophysiques et géologiques : établir une corrélation entre observations directes à travers des vérités terrain et observations indirectes à travers les attributs sismiques est une opération à prendre avec précaution car la corrélation entre les deux n'est pas immédiate. En effet, la réponse acoustique d'un tel réflecteur, c'est à dire sa trace sismique, dépend du contenu fréquentiel du signal source (Burrige *et al.* [9], Widess [86]) et dans ce cas, la méthode de caractérisation par réponse en ondelettes constitue un intérêt particulier pour la détermination d'attributs sismiques multiéchelles : la morphologie de la ligne d'extrema renseigne sur la transition entre structure interne et structure à grande échelle du réflecteur, c'est à dire l'identification de sa taille caractéristique.

II.1.2 Réponse en ondelettes à partir de sources sismiques : distorsions induites

Comme nous le décrivons en Section I.1, la mise en œuvre de la réponse en ondelettes utilise des sources acoustiques bien contrôlées, à savoir des ondelettes de type dérivées de Gaussiennes $\xi_n(t) = \frac{d^n}{dt^n} e^{-t^2}$. Bien adaptée aux configurations d'expérimentations en cuve acoustique par exemple, cette contrainte sur la source acoustique n'est actuellement pas satisfaite par la technologie des sources sismiques. Afin de pouvoir travailler avec des sources

contrôlées, répétitives et large bande, IFREMER met au point le système sismique SYSIF²⁵ tracté près du fond (Ker *et al.* [42], Marsset *et al.* [65]). Ce système haute résolution est équipé d'une source sismique qui peut être de deux types : une source haute fréquence (HF) et une source très haute fréquence (THF), qui émettent chacune un signal Chirp dans les gammes fréquentielles 220-1050 Hz et 580-2200 Hz, respectivement (Ker *et al.* [48]). Malgré leurs larges bandes de fréquence, ces sources restent à supports fréquentiels limités qui requièrent des traitements spécifiques afin de pouvoir optimiser l'exploitation de leurs contenus multifréquences. Pour cela, nous avons étendu la méthode d'analyse par réponse en ondelettes à la correction des effets induits par l'utilisation de sources sismiques, sous entendu sources sismiques à bande de fréquence limitée.

Pour introduire cette problématique, nous illustrons le cas d'un réflecteur de type créneau correspondant à une couche homogène placée dans un milieu homogène différent (Figure 8a). Dans le cas où l'attribut sismique du réflecteur est analysé *via* l'utilisation d'une famille d'ondelettes à support fréquentiel non limité, c'est à dire pour une gamme de dilatation d'ondelette $a \in \mathbb{R}^+$, la réponse en ondelettes est en accord avec le cas théorique étudié en Section I.1 avec une ligne d'extrema caractéristique du réflecteur complexe continue sur l'ensemble du domaine des dilatations (Figure 8c). Dans le cas d'utilisation *in situ* de sources sismiques HF et THF, les réponses en ondelettes respectives sont calculées sur des gammes de dilatation a restreintes par le support fréquentiel de chaque source, c'est à dire pour $a \in \mathcal{R}^{\text{HF}}$ et $a \in \mathcal{R}^{\text{THF}}$ (Figures 8d1-d2, respectivement) : il en résulte un attribut sismique multiéchelle distordu caractérisé par des lignes d'extrema discontinues entre elles (Figure 8e).

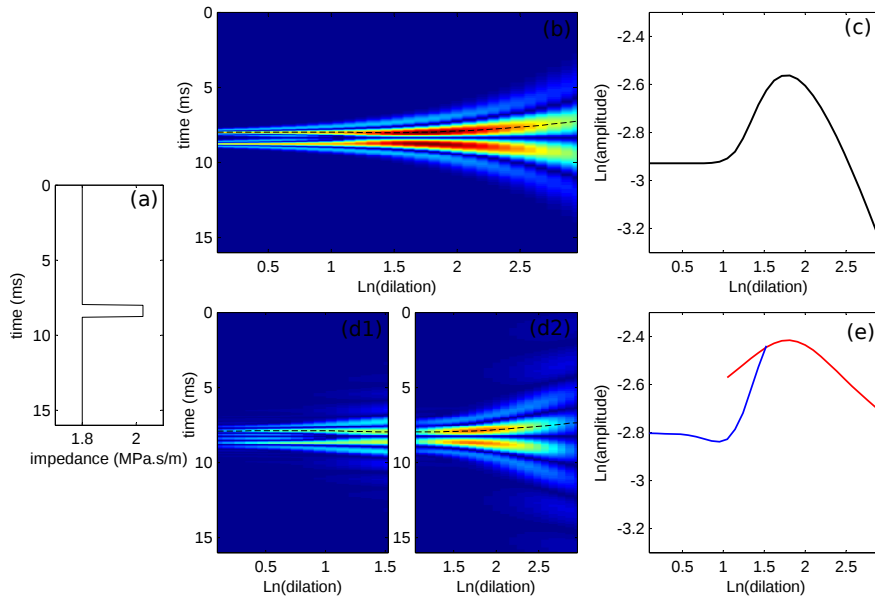


FIGURE 8 – (a) Profil d'impédance acoustique d'une discontinuité complexe de type créneau. (b) Réponse en ondelettes pour une source sismique à support fréquentiel non limité et (c) ligne d'extrema dans un diagramme log-log, sans distorsion. (d1 et d2) Réponses en ondelettes du réflecteur avec les sources THF et HF du SYSIF, respectivement, et (e) lignes d'extrema associées : mise en évidence des distorsions (extrait de Ker *et al.* [45]).

Dans ce cas, l'attribut sismique multiéchelle par réponse en ondelettes contenant l'infor-

25. SYSIF : SYstème SIsmique Fond

mation de la morphologie complexe du réflecteur se trouve perturbé et il est alors difficile d'en extraire des informations quantitatives fiables. Nous avons donc adapté la méthode d'analyse par réponse en ondelettes de telle sorte que ces distorsions puissent être en quelque sorte absorbées par un traitement spécifique : dans la section suivante, nous montrons que cette correction exploite également des propriétés intrinsèques aux ondelettes utilisées.

II.1.3 Méthode de correction de la réponse en ondelettes sismique

Dans Ker *et al.* [45], nous introduisons l'effet d'une source sismique $s(t)$ par une convolution supplémentaire dans l'équation (3b) en remplaçant $r(t)$ par $r(t) * s(t)$, d'où l'expression de la réponse en ondelettes modifiée :

$$\tilde{\mathcal{R}}[\xi_n, \gamma](t, a) = \mathcal{D}_a \xi_n(t) * r(t) * s(t) \quad (13a)$$

$$= [\mathcal{D}_a \xi_n(t) * s(t)] * r(t) \quad (13b)$$

Le terme noté entre crochets dans l'équation (13b) indique que la famille d'ondelettes utilisée dans la réponse en ondelettes modifiée du profil d'impédance acoustique γ est la transformée en ondelettes de la source sismique $s(t)$: dans ce cas, la forme des ondelettes constituant la famille en question varie avec la dilatation a appliquée à l'ondelette analysante $\xi_n(t)$.

Nous avons donc cherché à définir une ondelette analysante équivalente, notée ξ_l , permettant d'absorber ces variations. Pour cela, nous exploitons la propriété de stabilité des fonctions Lévy-alpha stables (Voit [84]) dont la forme générale est :

$$L\left(\frac{t}{a_1}\right) * L\left(\frac{t}{a_2}\right) = \alpha L\left(\frac{t}{a_3}\right) \quad (14)$$

où $*$ représente le produit de convolution, t est la variable de la fonction L et les autres termes sont des constantes. En particulier, la fonction exponentielle $L(t) = e^{-t^2}$ possède cette propriété et il en est de même pour ses dérivées, c'est à dire les fonctions Gaussiennes (Ker *et al.* [43]). Dans l'équation (13b), nous pouvons noter $\mathcal{D}_a \xi_n(t) = \frac{d^n}{dt^n} L(t/a)$. En recherchant un modèle $b(t)$ de source, tel que $b(t) * s(t) \simeq b(t)$ au sens des moindres carrés, de la forme $b(t) = b_0 \frac{d^m}{dt^m} L(t/a_b)$, nous démontrons que la réponse en ondelettes modifiée s'exprime par :

$$\tilde{\mathcal{R}}[\xi_n, \gamma](t, a) = \alpha \mathcal{D}_{a_l} \xi_l(t) * r(t) \quad (15a)$$

$$= \alpha \mathcal{R}[\xi_l, \gamma](t, a_l) \quad (15b)$$

où a_l est un nouveau facteur de dilatation et l'ondelette analysante effective ξ_l est une dérivée de Gaussienne d'ordre l : $\xi_l(t) = \frac{d^l}{dt^l} e^{-t^2}$. Nous montrons que les paramètres à considérer sont définis par (Ker *et al.* [43]) :

$$\left\{ \begin{array}{l} l = n + m \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_l = \sqrt{a^2 + a_b^2} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 2 b_0 a_b \sqrt{\pi} \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left. \right\} \quad (19)$$

et notons que le nouveau domaine des dilatations n'est plus \mathbb{R}^+ mais $a_l > a_b$, c'est à dire limité par la dilatation de l'ondelette du modèle de source.

La détermination des ordres m et n est basée sur un compromis entre un modèle de source optimisé et une ondelette effective d'ordre l minimale pour réduire la complexité de l'attribut sismique multiéchelle basé sur le suivi des lignes d'extrema. L'ordre de dérivation de l'ondelette analysante n'étant pas contraint, nous pouvons considérer sa valeur minimale $n=1$ et chercher à optimiser m . Dans un premier temps, nous démontrons le potentiel de la méthode sur le cas d'une discontinuité synthétique de type créneau analysée à l'aide des sources sismiques réelles et déconvoluées HF et THF du système sismique SYSIF (Figure 9).

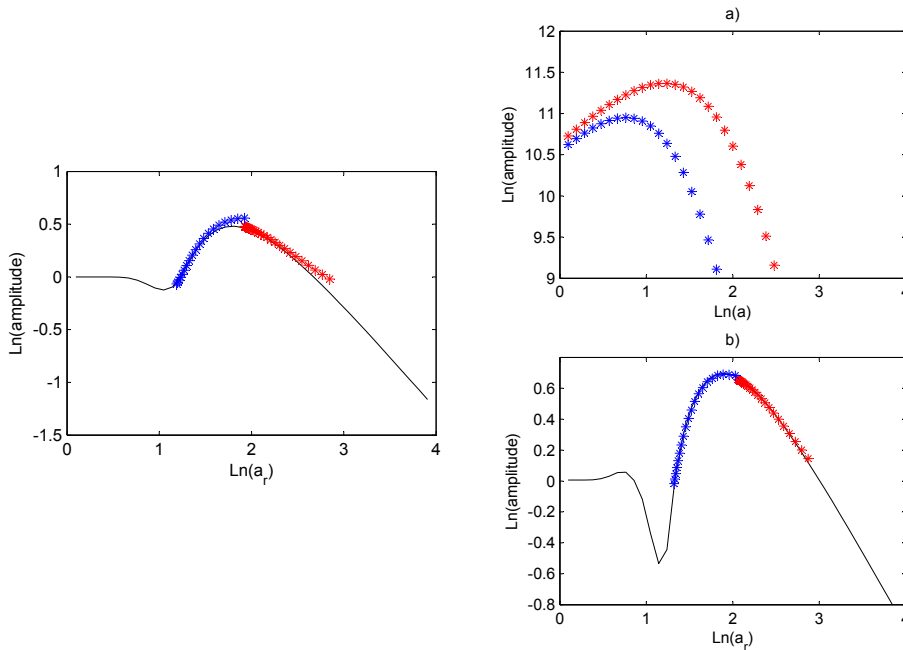


FIGURE 9 – Lignes d'extrema extraites de la réponse en ondelettes d'un créneau analysé avec les sources SYSIF (HF en rouge, THF en bleu). Gauche : modèle de source $m=3$. Droite : modèle de source $m=4$ (a) dans le domaine des dilatations de chaque source et (b) dans le domaine des dilatations effectives de $\xi_l(t)$ (extraites de Ker et al. [43]).

Les résultats rendent clairement compte des corrections apportées par le traitement multiéchelle sur les lignes d'extrema des deux sources : l'information quantitative contenue dans les lignes d'extrema est ainsi préservée. La méthode de correction peut être généralisée à des ordres de dérivation non entiers, ce qui permet d'optimiser la détermination du modèle de la source sismique et par là même la correction des distorsions.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à des profils naturels caractéristiques des couches sédimentaires de subsurface. Pour cela, nous avons exploité les données acquises par l'IFREMER durant la campagne ERIG3D (Ker et al. [48]) : les mesures de vitesse et de densité réalisées en forage ont permis d'établir le profil d'impédance acoustique représenté en fonction de la profondeur (Figure 10a). La trace sismique synthétique déterminée à partir de ce profil est alors analysée par réponse en ondelettes. Le cas d'une source sismique à bande de fréquence non limitée, c'est à dire une gamme de dilatations appartenant à \mathbb{R}^+ , est étudié

II IMAGERIE SISMIQUE DE RÉFLECTEURS IMMERGÉS : SUBSURFACE ET SURFACE SÉDIMENTAIRES, STRUCTURES OCÉANOGRAPHIQUES

dans un premier temps afin d'établir la solution de référence (Figure 10b). Dans un second temps, nous mettons en œuvre des sources sismiques réelles, à savoir les sources HF et THF du système sismique SYSIF, toutes deux à support fréquentiel limité. La correction des effets de distorsions induits par la source est alors appliquée, avec un modèle de source $m = 4$ et une ondelette analysante $n = 1$ (Figure 10c). Notons la discontinuité présente dans la réponse en ondelettes, cet effet provenant de la transition entre les domaines de dilatation \mathcal{R}^{HF} et \mathcal{R}^{THF} des sources HF et THF, respectivement. Les attributs sismiques de deux réflecteurs, identifiés sur le profil d'impédance, sont alors extraits de cette réponse en ondelettes et ces lignes d'extrema peuvent ainsi être directement comparées aux cas de référence indiqués par une ligne continue sur les Figures 10d-e.

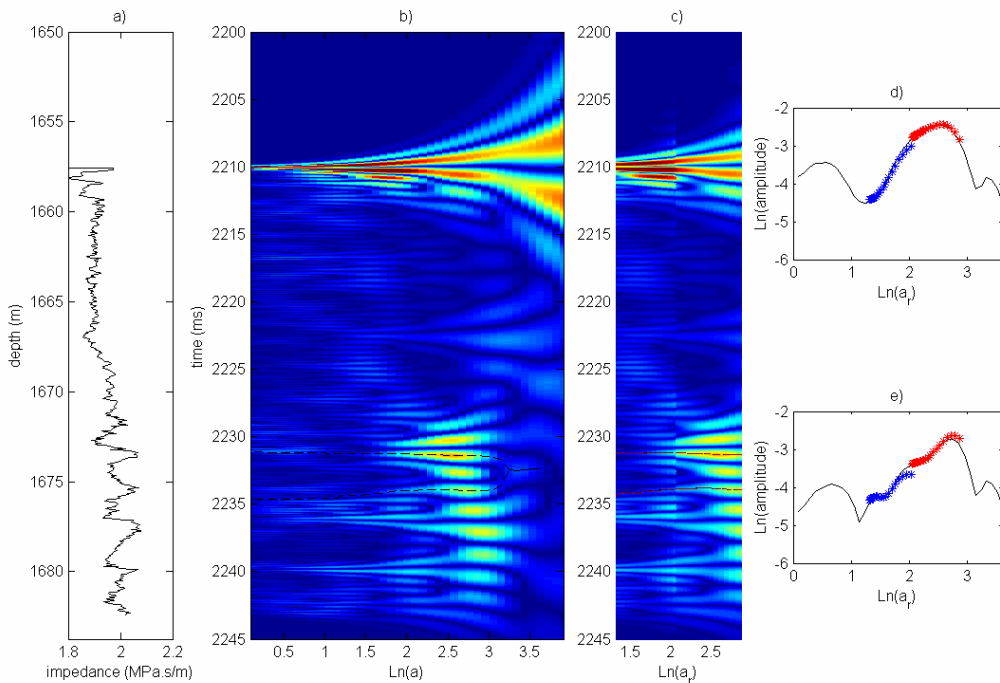


FIGURE 10 – (a) Profil vertical d'impédance acoustique in situ sur lequel sont calculées les réponses en ondelettes (b) avec une source à support fréquentiel non limité et (c) avec les sources sismiques HF et THF corrigées. (d-e) Lignes d'extrema pour deux réflecteurs sismiques : données THF (bleu), HF (rouge) et référence (ligne continue) (extrait de Ker et al. [43]).

Par une extension de ces travaux, nous montrons que la correction de l'attribut sismique peut être considérablement améliorée en étendant la correction au cas d'ondelettes analysantes définies par des ordres non entiers de dérivation d'une Gaussienne (Figure 11), ce qui optimise notamment la détermination du modèle de source (Ker et al. [44]).

Ces travaux ont également fait l'objet d'une récente application sur le cas de couches sédimentaires riches en gaz (Ker et al. [47]). Les données ont été acquises par l'IFREMER qui a mis en œuvre le système sismique SYSIF tracté près du fond de la marge Ouest de l'archipel de Svalbard. Sur les profils sismiques obtenus, des anomalies d'amplitude ont été mises en évidence sur la réflectivité sismique de zones particulières, à savoir des *points brillants*. A partir de la réponse en ondelettes par correction de la source, nous avons pu proposer une interprétation de ces anomalies dont l'origine se trouve être liée à une distribution spatiale

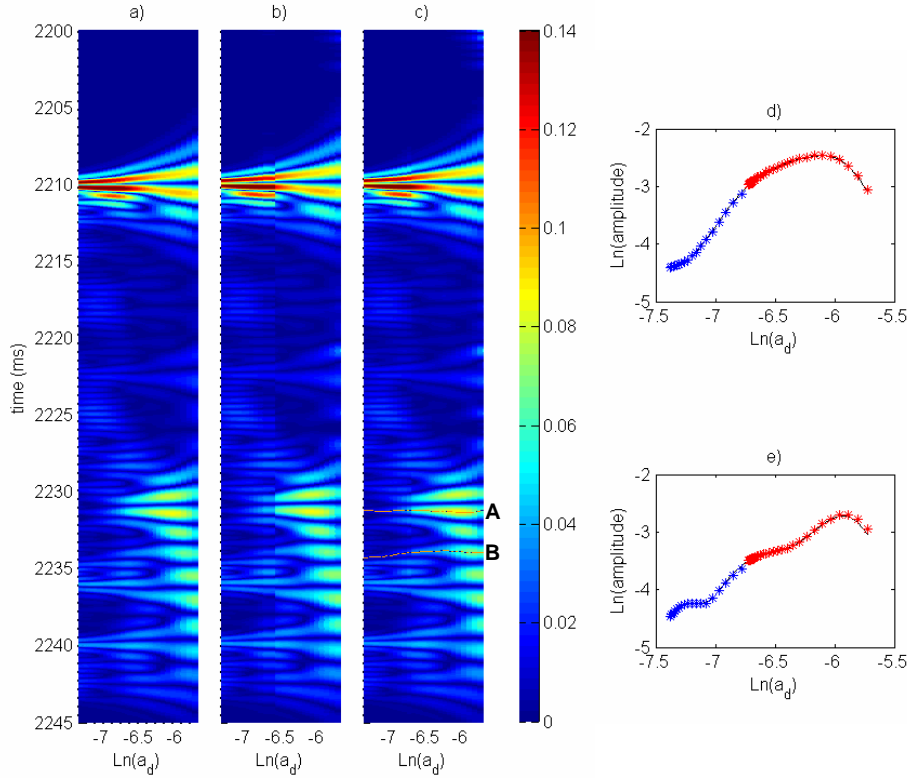


FIGURE 11 – Réponses en ondelettes d’un profil d’impédance acoustique *in situ* : (a) source de dilatation infinie, (b) modèles de sources HF et THF de dérivée entière de Gaussienne et (c) de dérivée non entière où les lignes d’extrema de deux réflecteurs sont illustrées en (d) et (e) avec le cas d’une source de dilatation infinie (extrait de [44]).

du gaz sous forme de patches. Une première approche de quantification à partir des attributs sismiques multiéchelles basés sur la méthode de réponse en ondelettes a permis d’estimer la dimension caractéristique de ces structures de taille décimétrique.

II.1.4 Extension à la fusion de données sismiques multifréquences

Avec cette approche de correction des effets de distorsions multiéchelles induits par une source sismique à bande de fréquence limitée, nous avons pu aborder de manière originale la problématique de fusion de données mettant en œuvre plusieurs sources de contenus fréquentiels différents (Ker *et al.* [44]). L’intérêt est qu’en exploitant le potentiel de cette méthode de fusion de sources, la gamme fréquentielle d’analyse d’un réflecteur peut être considérablement augmentée, opération non conventionnelle propice à l’analyse multiéchelle d’un réflecteur complexe. Cette amélioration de la méthode de caractérisation est déjà mise en évidence dans la section précédente et nous montrons ici comment l’exploiter davantage en tirant profit d’une autre propriété de la transformée en ondelettes : à partir des coefficients d’ondelettes calculés, il est possible de déterminer le signal associé qui, dans le cas d’une extension à la réponse en ondelettes, correspond à la fonction de Green du milieu. Dans ce

II IMAGERIE SISMIQUE DE RÉFLECTEURS IMMERGÉS : SUBSURFACE ET SURFACE SÉDIMENTAIRES, STRUCTURES OCÉANOGRAPHIQUES

cas, la formule dite de reconstruction (Gibert *et al.* [24], Mallat [63]) s'exprime par :

$$r(t) \equiv \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty R[\xi, p](t, a) \xi \left(\frac{t - \tau}{a} \right) \frac{d\tau da}{a^2}, \quad (20)$$

où le profil d'impédance acoustique $p(z)$ s'obtient par intégration temporelle de la fonction $r(t)$. L'intégrale en dilatation a correspond ici à une source sismique à bande de fréquence non limitée, c'est à dire \mathbb{R}^+ . Dans le cas de la fusion de deux réponses en ondelettes construites à partir de deux sources sismiques HF et THF, l'intégration est limitée à l'union des deux domaines.

Dans la mesure où les données sismiques HF et THF présentées dans la section précédente ne correspondent pas exactement à la même zone d'étude, nous illustrons l'approche de reconstruction sur un cas synthétique. A partir des mesures *in situ* de vitesse et de densité, le profil d'impédance acoustique peut être déterminé et représenté en fonction de la profondeur (Figure 12a).

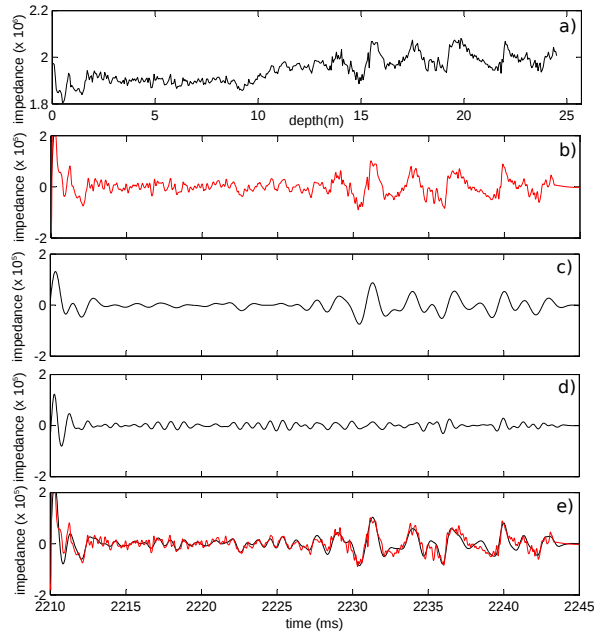


FIGURE 12 – Profil d'impédance acoustique (a) mesuré *in situ* en fonction de la profondeur, (b-d) inversé à partir d'une réponse en ondelettes calculée respectivement sur \mathbb{R}^+ , \mathcal{R}^{HF} et \mathcal{R}^{THF} , et (e) inversé par fusion des données HF et THF (ligne noire) superposé au cas (b) (ligne rouge) (modifié de Ker *et al.* [44]).

Nous construisons la réponse en ondelettes synthétique de ce profil en considérant dans un premier temps une source sismique à support fréquentiel non limité (cas \mathbb{R}^+) et par reconstruction inverse, la fonction de Green est obtenue puis intégrée pour établir le profil d'impédance acoustique dans le domaine temporel (Figure 12b). Dans ce cas idéal, la morphologie du profil inversé est en très bon accord avec celle du profil extrait des données réalisées *in situ* en forage : la composante continue n'étant pas reconstruite, les valeurs d'impédance reconstruites sont donc relatives. En considérant les sources sismiques HF et THF du système SYSIF, nous calculons les réponses en ondelettes synthétiques corrigées des effets de distorsions et reconstruisons le profil d'impédance acoustique sur des gammes de dilatations

limitées, respectivement \mathcal{R}^{HF} et \mathcal{R}^{THF} (Figures 12c-d) : l'influence du support fréquentiel de la source sismique sur la reconstruction du signal est très claire. En exploitant la fusion des données HF et THF maintenant permise par la méthode de correction des sources, nous déterminons le profil d'impédance sur une gamme de dilatations étendue $\mathcal{R} = \mathcal{R}^{\text{HF}} \cup \mathcal{R}^{\text{THF}}$ (Figure 12e) : le très bon accord entre les profils inversés sur \mathcal{R} (noir) et sur \mathbb{R}^+ (rouge) met en évidence le potentiel de la méthode pour optimiser la reconstruction de la fonction de Green d'un milieu en fusionnant des données acquises par différentes sources sismiques.

Nous avons donc suivi cette approche synthétique pour aborder le cas de données sismiques, c'est à dire reconstruire le profil d'impédance acoustique non pas en un point de la subsurface mais avec une extension latérale afin d'imager la structure du milieu. En fusionnant les données sismiques *in situ* HF et THF, nous pouvons imager quantitativement la subsurface (Figure 13a) : pour remonter au paramètre physique de la densité, nous pouvons négliger les variations de vitesses dans le milieu et nous considérons la composante continue de l'impédance acoustique au niveau du forage de mesures *in situ* pour l'ensemble des traces sismiques. Nous obtenons ainsi la carte des variations de densité de la subsurface (Figure 13b).

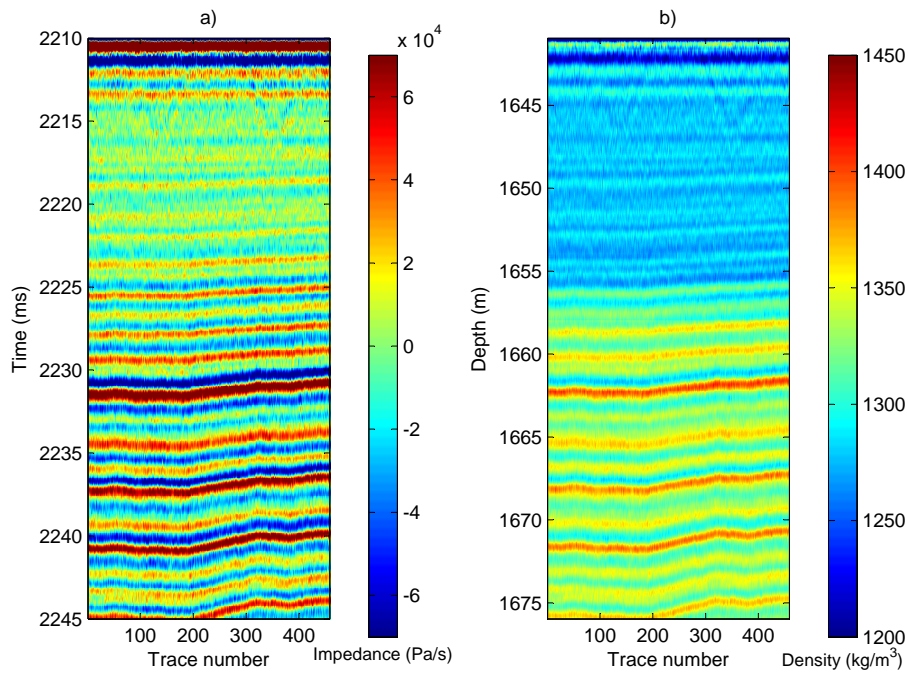


FIGURE 13 – a) Imagerie de subsurface construite par inversion de réponse en ondelettes de données sismiques. b) Carte de densité correspondante, en supposant une extension latérale du contenu basse fréquence du profil d'impédance *in situ* (extrait de Ker et al. [44]).

II.1.5 Synthèse de la méthode d'analyse par réponse en ondelettes

La méthode de caractérisation sismique multiéchelle par réponse en ondelettes, développée initialement pour des expériences de laboratoire, a été valorisée de manière originale pour des problématiques d'imagerie sismique de subsurface, notamment à travers les données de sismique haute résolution de l'IFREMER exploités durant les travaux de thèse de Stéphan Ker qui ont donné lieu aux publications référencées.

Le principe général de la méthode d'analyse sismique multiéchelle basée sur la réponse en ondelettes est synthétisé sur le schéma de la Figure 14 qui rend compte des différentes étapes des traitements mis œuvre.

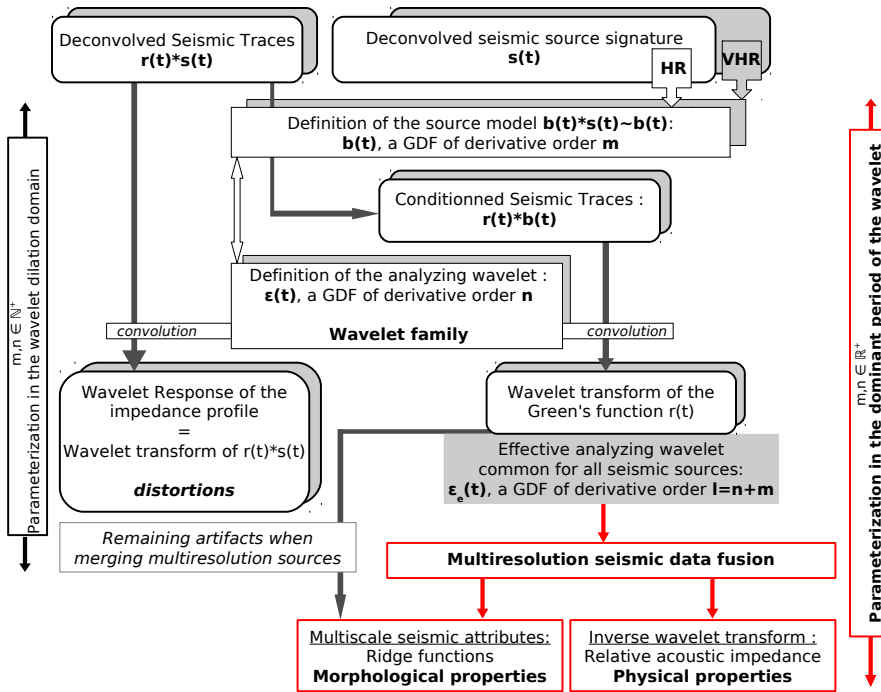


FIGURE 14 – Schéma de principe des traitements pour la fusion de données sismiques haute résolution multiscapteurs (extrait de Ker et al. [44]).

Comme nous le présentons en Section II.3, ces travaux méthodologiques développés pour l'imagerie sismique de réflecteurs complexes de subsurface ont pu être étendus aux cas d'interfaces océanographiques localisées dans la colonne d'eau. Entre les deux se situe la surface des fonds marins, dont l'imagerie acoustique haute résolution nécessite l'utilisation de fréquences plus élevées qui donnent lieu à des processus physiques différents, notamment la rétrodiffusion acoustique abordée dans la section suivante (Section II.2).

II.2 Fonds marins : identification de textures hétérogènes par imagerie de rétrodiffusion acoustique

II.2.1 Rétrodiffusion acoustique mesurée par sondeurs multifaisceaux

Au cours des campagnes à la mer de géophysique marine auxquelles j'ai participé (liste décrite p. 13), j'ai travaillé notamment sur l'utilisation et l'exploitation de différents sondeurs déployés pour l'imagerie de surface, tels que les sonars latéraux et les sondeurs multifaisceaux. Ces sondeurs, fixés sur la coque du navire ou portés près du fond par un appareil tracté ou autonome (AUV), connaissent un essor considérable depuis quelques années en terme de développements technologiques et méthodologiques des sondeurs multifaisceaux notamment (Augustin *et al.* [3], De Moustier and Matsumoto [17], Lamarche *et al.* [51]). Il s'agit de sondeurs acoustiques très hautes fréquences – plusieurs dizaines de kHz – qui permettent de caractériser la surface des fonds marins à la fois en terme de relief (bathymétrie) et de texture (imagerie). Les mesures de bathymétrie portent sur l'instant de détection de l'écho reçu après émission d'un pulse acoustique (niveau d'émission SL) et les mesures d'imagerie acoustique portent sur l'intensité de l'écho reçu (niveau de réception EL), exprimée par l'équation du sonar écrite sous forme simplifiée $EL = SL - 2TL + BS$ (Urlick [83]) où les termes dépendent de l'angle d'incidence θ du faisceau acoustique. $TL(\theta)$ représente les pertes par transmission, comprenant l'atténuation dans la tranche d'eau et la divergence géométrique du signal acoustique. $BS(\theta)$ est l'indice de rétrodiffusion acoustique de la zone insonifiée : il dépend à la fois de la nature géologique du substrat (texture) et de ses propriétés géométriques (micro-relief, rugosité). L'objectif est d'établir la courbe de rétrodiffusion acoustique $BS(\theta)$ caractéristique de l'interface complexe du fond marin étudié.

II.2.2 Imagerie acoustique de substrats hétérogènes

C'est au cours de mon post-doc au NIWA et à Géosciences Azur que j'ai acquis mes compétences sur l'exploitation des signaux acoustiques acquis par sondeurs multifaisceaux. Il s'agit en particulier de l'EM300 (Kongsberg), qui fonctionne à 30 kHz sur 135 faisceaux. Parmi les logiciels d'exploitation existants, MB-System²⁶ (Caress and Chayes [11]) est un logiciel libre permettant de travailler sur ces données à des fins de traitement et de représentation de la bathymétrie et de la réflectivité acoustique. J'ai pris en main cet outil en y intégrant des modules que j'ai développés pour exploiter les données de réflectivité acoustique en particulier, afin de mieux contraindre la solution de l'équation du sonar et assurer une meilleure interprétation des résultats. Pour la publication de ces travaux (Le Gonidec *et al.* [58]), j'ai pris en compte les mesures *in situ* des propriétés physiques de la colonne d'eau pour corriger la propagation acoustique et associé ces mesures acoustiques à des observations directes par photographies de la texture des réflecteurs. Cette approche globale a permis de mettre au point une méthode de caractérisation de textures hétérogènes, comme celle existant sur un volcan sous marin actif où co-existent à la fois une couverture sédimentaire et des coulées de lave consolidées (Figure 15).

26. Caress, D.W. and Chayes, D.N., 2003, MB-System, Open source software distributed from URL : <http://www.ldeo.columbia.edu/MB-System>.

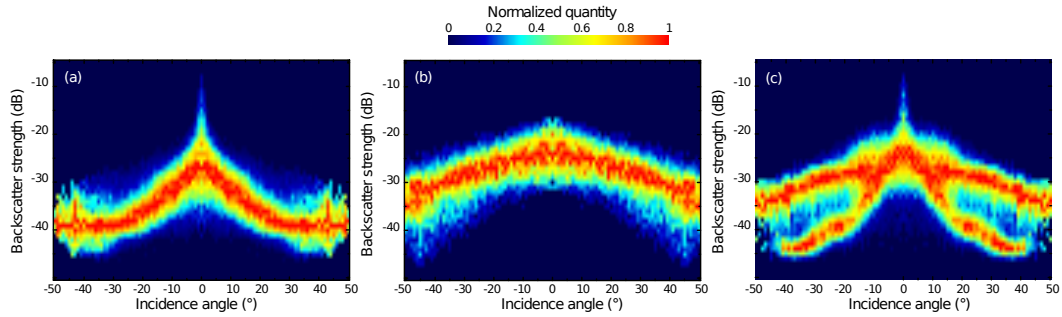


FIGURE 15 – *Distribution des courbes de rétrodiffusion pour différentes textures observées autour d'un volcan sous marin (Haungarao N-Z, ride Kermadec), associées à (a) un fond sédimentaire, (b) une zone de coulée de lave consolidées et (c) une texture hétérogène située sur la caldera du volcan (modifié de Le Gonidec et al. [58]).*

Cette méthode peut être utilisée ensuite pour segmenter la carte de réflectivité par identification des textures co-existantes, approche que j'ai testée sur des données de rétrodiffusion acoustiques acquises dans le détroit de Cook, situé entre l'île du Nord et l'île du Sud de la Nouvelle-Zélande. Ce détroit est le lieu de forts courants sous marins qui perturbent le transport sédimentaire dans cette région très étudiée pour des raisons de communication entre les deux îles (installation de câbles sous marins notamment). Pour cela, de nombreuses données de relevés géophysiques et vérités terrain existent, données que j'ai exploitées pour proposer une première segmentation des textures du fond marin du détroit de Cook (Figure 16).

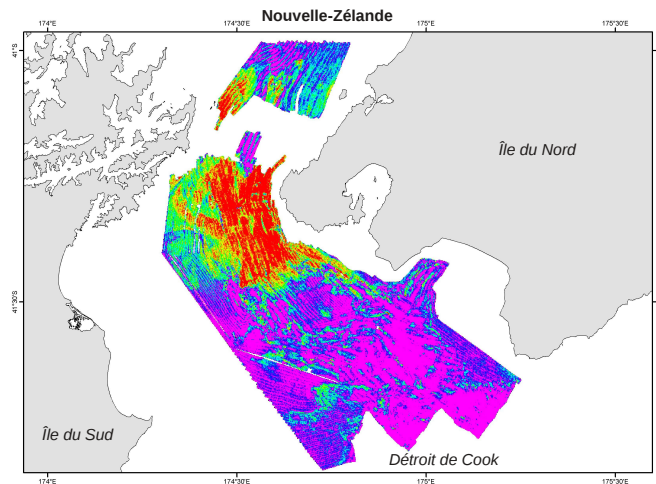


FIGURE 16 – *Segmentation de la texture du fond marin dans le détroit de Cook (N-Z) : le détroit est principalement recouvert roches (en rouge), les dépôts de sédiments fins et de vase (en magenta) étant transportés par les courants et piégés dans des canyons sous marins.*

A la suite de ces travaux, enrichis par des collaborations avec l'équipe d'Acoustique Sous-Marine de l'IFREMER, j'ai investi mes compétences dans plusieurs chantiers pilotés par les chercheurs de Géosciences-Azur. Il s'agit par exemple des zones d'instabilité situées au large de la Colombie-Equateur (Collot *et al.* [14]) : cette zone est le lieu de séismes de fortes amplitudes qui peuvent déclencher des glissements de terrain sous-marins, identifiables sur les données de réflectivité par la remobilisation de la couche sédimentaire superficielle. Il s'agit

également des courants de turbidité de la zone distale en Méditerranée orientale au large du Nil, et du bassin Ligure caractérisé par un relief de canyons sous-marins et de cicatrices d'arrachement (Migeon *et al.* [68]). Mon investissement dans ces études a essentiellement concerné le développement de chaînes de traitement de données de sondeurs et la réalisation de cartes géophysiques : j'ai cependant pu abordé une approche de caractérisation multifréquence à partir de données acquises par différents sondeurs multifaisceaux mais l'aspect quantitatif est resté limité, notamment par des aspects de calibration non triviaux des sondeurs en développement à l'IFREMER.

Depuis, mes collaborations avec l'IFREMER se sont principalement approfondies avec l'équipe de Géosciences Marines pour l'exploitation de données sismiques haute résolution : comme introduite en début de section, cette collaboration porte sur des développements méthodologiques multiéchelles pour des interfaces de subsurface (Section II.1) et plus récemment pour des structures océanographiques présentées dans la section suivante avec le cas des thermoclines (Section II.3).

II.3 Interfaces océanographiques : réflectivité sismique multiéchelle

II.3.1 Contexte de l'étude : thermocline saisonnière

Des réflecteurs sismiques existent également dans la colonne d'eau qui recouvre les fonds marins : bien que très faibles, leurs contrastes d'impédance acoustique sont suffisants pour permettre aux nouveaux systèmes sismiques de détecter des interfaces, notamment les thermoclines saisonnières identifiées pour la première fois en 2013 (Piété *et al.* [78]).

L'intérêt d'étudier ces réflecteurs dynamiques, c'est à dire qui fluctuent au gré des saisons et des conditions météorologiques, réside en particulier dans les importantes surfaces d'échanges qui existent entre les masses d'eau mises en jeu. Ces interfaces turbulentes sont riches en processus physiques complexes, notamment en terme d'échanges thermiques. L'imagerie sismique de telles interfaces met en évidence une dépendance de la réflectivité sismique avec le contenu fréquentiel de la source utilisée (Hobbs *et al.* [33], Piété *et al.* [78]), comme le prévoit le cadre théorique de la réponse en ondelettes.

C'est dans ce cadre d'étude scientifique en plein développement que la caractérisation sismique multiéchelle présente un nouvel attrait : nous nous sommes donc récemment intéressés à exploiter la réponse en ondelettes pour mieux comprendre la réflectivité sismique liée à ces interfaces complexes. Ceci a donné lieu à des travaux en collaboration avec des chercheurs de l'IFREMER (équipes GM²⁷ et LPO²⁸) sur l'imagerie acoustique multiéchelle d'une thermocline identifiée sur des données sismiques très haute résolution.

Deux campagnes sismiques ont été conduites en 2012 sur la thermocline saisonnière du plateau Armoricaïn. Avec la première, la thermocline est détectée sur le profil sismique où elle ressort comme un réflecteur sismique faible. Par contre, ce réflecteur n'est pas observé avec la seconde campagne. L'objectif de notre étude a été de mieux comprendre ces observations et d'en fournir une explication quantitative (Ker *et al.* [46]).

27. GM : Géosciences Marines

28. LPO : Laboratoire de Physique des Océans

II.3.2 Réflectivité sismique : quantification par réponse en ondelettes

Une thermocline se caractérise par un contraste de température le long d'un profil de mesures CTD²⁹ vertical, réalisé dans la colonne d'eau pour déterminer les profils de température et de salinité. En première approximation, nous montrons que ce profil de température peut être modélisé par une fonction d'erreur de Gauss et peut s'exprimer par (Ker *et al.* [46]) :

$$T(z) = T_0 - \frac{\Delta T}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z - z_0}{\Delta z/4} \right) \right) \quad (21)$$

où z_0 est la profondeur de la thermocline, Δz son épaisseur, ΔT son amplitude et T_0 la température du milieu supérieur. Sur un cas particulier, nous montrons que ce modèle est bien en accord avec les mesures *in situ* de température (Figure 17, gauche).

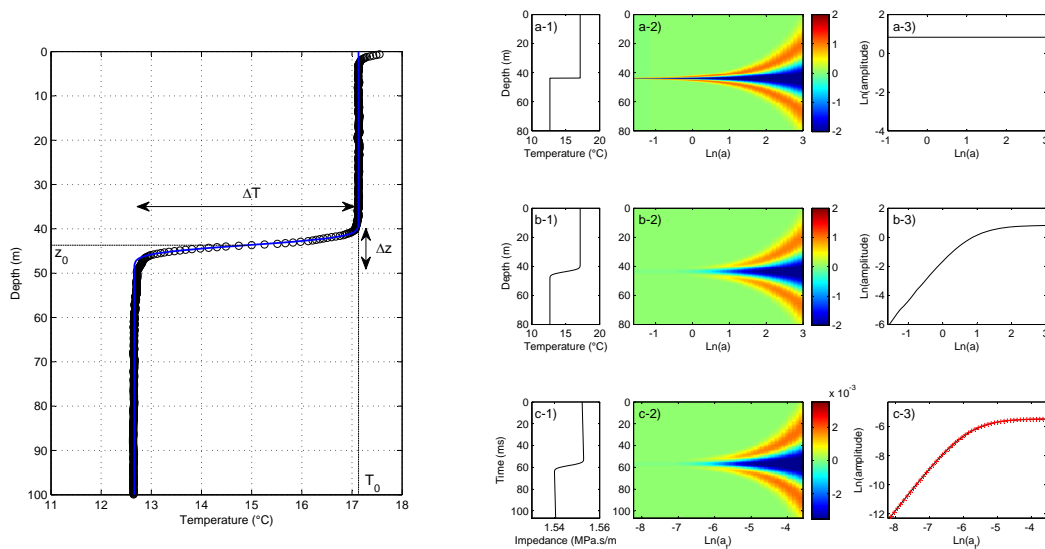


FIGURE 17 – Gauche : Profil de température par mesures CTD (noir) associé à une fonction d'erreur de Gauss (bleu). Droite : (a-1) thermocline sans taille caractéristique analysée par (b-1) transformée en ondelettes et (c-1) ligne d'extrema; (a-2) modèle spatial de thermocline d'épaisseur ΔZ analysée (b-2) par transformée en ondelettes et (c-2) ligne d'extrema; (a-3) modèle temporel de thermocline d'épaisseur ΔZ analysée (b-3) par réponse en ondelettes et (c-3) ligne d'extrema (noir) associée à la solution analytique de l'équation (24) (rouge) (extrait de Ker *et al.* [46]).

La salinité d'une thermocline peut être considérée comme constante, d'après les mesures réalisées *in situ*, et la vitesse acoustique dépend donc essentiellement de la température (Sallarès *et al.* [79]). D'autre part, l'influence des contrastes de densité sont négligeables et par conséquent, la réflectivité acoustique d'une thermocline est dominée par l'existence de contrastes de température. En considérant au premier ordre une dépendance linéaire entre la vitesse v , inconnue *a priori*, et la température T , nous montrons que l'équivalence de l'équation (3b) entre réponse et transformée en ondelettes conduit à $\mathcal{R}[\xi_n, v](t, a) \equiv \mathcal{W}[\xi_n, dT(z)/dz](z, a)$, où l'ondelette analysante ξ_n est une dérivée de Gaussienne d'ordre n .

29. CTD : Conductivity Temperature Depth

Nous montrons que le profil de contraste de température peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{dT(z)}{dz} = \frac{-\Delta T}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\kappa \Delta z} \exp\left(\frac{-(z - z_0)^2}{2(\kappa \Delta z)^2}\right) \quad (22)$$

où nous reconnaissons l'expression d'une Gaussienne. Cette propriété, spécifique au modèle de profil de température considéré, est de première importance car elle permet de faire à nouveau intervenir les propriétés des fonctions Lévy-alpha stable décrites dans la Section II.1 et nous démontrons que la réponse en ondelettes peut alors s'écrire :

$$R[\xi_n, v](t, a) = r_0 \left(\frac{a}{a'}\right)^{n+1} \frac{1}{a'} \xi_n \left(\frac{t - t_0}{a}\right) \quad (23)$$

où $a = 1/\pi f_p$ est la dilatation de l'ondelette de fréquence f_p et la dilatation $a' = \sqrt{a^2 + 2\left(\frac{\kappa \Delta z}{v}\right)^2}$ dépend de la morphologie de la thermocline et de la vitesse v . En particulier, en considérant le cas d'une ondelette analysante de type Ricker ($n = 2$), nous démontrons que la réflectivité acoustique d'une thermocline modélisée par une fonction d'erreur de Gauss peut finalement s'écrire sous forme analytique :

$$r = r_0 \left(1 + 2\left(\frac{\pi \kappa \Delta z}{\lambda}\right)^2\right)^{-\frac{3}{2}}, \quad (24)$$

dont l'expression en dB conduit à $r^{dB} = r_0^{dB} + \Lambda^{dB}$ avec :

$$\begin{cases} r_0^{dB} = 20 \log_{10}(r_0) & (25) \\ \Lambda^{dB} = -30 \log_{10}\left(1 + \left(\frac{4}{\pi} \frac{\lambda}{\Delta z}\right)^{-2}\right) & (26) \end{cases}$$

L'équation (25) exprime le coefficient de réflexion à grande échelle de la thermocline, défini par : $r_0 = (v(T_0 - \Delta T) - v(T_0)) / (v(T_0 - \Delta T) + v(T_0))$. Le terme Λ^{dB} de l'équation (26) dépend du rapport entre la longueur d'onde de l'ondelette source $\lambda = 1/v f_p$ et la dimension caractéristique Δz de la thermocline : ce terme d'atténuation met en évidence la dépendance de la réflectivité sismique d'une thermocline avec la fréquence de la source (Figures 17, droite).

Nous avons appliqué cette approche pour interpréter les observations faites à l'issue des deux campagnes IFREMER où la thermocline peut être détectée dans un cas et pas dans l'autre. L'analyse fait abstraction de l'existence du niveau de bruit ambiant, lié à l'électronique embarquée et aux conditions de mer notamment. En considérant des bruits similaires dans les deux conditions d'acquisition, nous montrons que la réflectivité de la thermocline est contrôlée par le rapport $\lambda/\Delta z$ qui est plus fort dans le cas de la thermocline détectée. Pour cette étude, nous considérons les mesures CTD des campagnes respectives pour lesquelles nous avons déterminé les réponses en ondelettes synthétiques et extrait les lignes d'extrema. Dans ces conditions, nous avons pu considérer l'expression complète de la vitesse en fonction de la température, reliées par l'équation d'état, et ainsi comparé les solutions au cas d'un

modèle de thermocline basé sur une fonction d'erreur de Gauss (Figure 18).

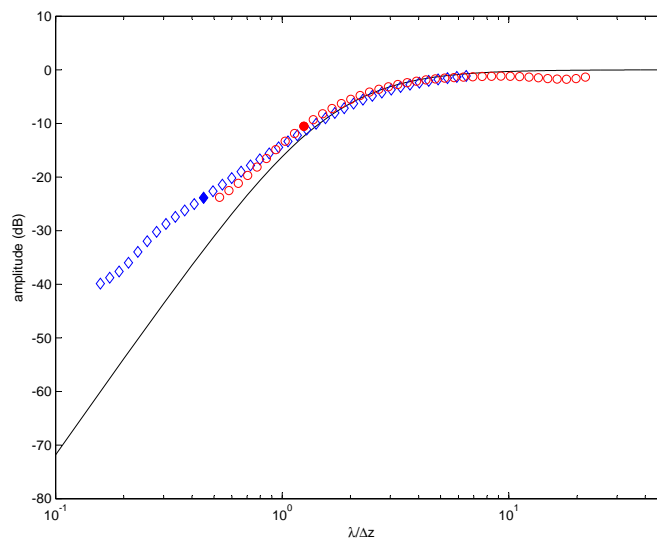


FIGURE 18 – Courbes montrant l'atténuation induite sur la réflectivité sismique d'une thermocline : les symboles montrent les résultats associés aux thermoclines *in situ* et la ligne continue correspond à un modèle d'erreur de Gauss.

Nous mettons en évidence que les amplitudes obtenues dans une certaine gamme de rapport $\lambda/\Delta z$ pour les analyses faites sur les données sismiques est en très bon accord avec la solution analytique extraite du modèle de thermocline basé sur une fonction d'erreur de Gauss. Ceci ouvre notamment d'intéressantes perspectives sur l'étude des processus physiques, de turbulences par exemple, qui peuvent exister au niveau des interfaces océanographiques.

BILAN DE CES TRAVAUX EN QUELQUES POINTS

- ▷ Développements méthodologiques pour l'imagerie sismique de réflecteurs de subsurface par valorisation de la réponse en ondelettes d'une interface complexe : nouveaux attributs sismiques multiéchelles, fusion de données ;
- ▷ Développements de codes de traitements de données de sondeurs multifaisceaux pour l'imagerie des fonds marins : campagnes à la mer ;
- ▷ Caractérisation sismique multiéchelles d'interfaces océanographiques par réponse en ondelettes ;
- ▷ Perspectives de travaux de recherche de valorisation.

- ▷ Collaborations nationales et internationales (IFREMER, Géoazur, NIWA) ;
- ▷ Encadrement de travaux de thèse et de Master ;
- ▷ Publications de rang A.

III Monitoring par sondages acoustiques et micro-sismicité d'un massif argileux en cours d'excavation

III.1 Description du contexte des expérimentations acoustiques *in situ*

Le laboratoire de recherche souterrain de l'URL³⁰ du Mont Terri (Suisse), dirigé par l'Office Fédéral de Topographie (Swisstopo), est un projet de recherche international dédié à la caractérisation hydrogéologique, géochimique et géotechnique d'un site de stockage en formation argileuse. En l'occurrence, il s'agit de l'argilite à Opalinus, une roche peu perméable et dont les micro-fractures, créées par déconfinement suite à des procédures d'excavation par exemple, sont susceptibles de s'autocolmater et ainsi ne pas favoriser la diffusion des radionucléides vers la surface. Cependant, pour permettre d'assurer le suivi à long terme de tels sites en condition de stockage, la compréhension des processus physiques et mécaniques induits lors d'une excavation de galerie reste indispensable : une zone d'endommagement de la roche encaissante se concentre au voisinage de la paroi, dans une zone appelée EDZ³¹ qui s'étend sur une profondeur métrique dans la roche (Bossart *et al.* [7], Martino and Chandler [67]).

C'est sur la problématique de suivi spatio-temporel de cette EDZ que s'inscrit le projet EZ-G08, avec la mise en place d'expérimentations géophysiques *in situ*, notamment de méthodes acoustiques (Le Gonidec *et al.* [61]). L'expérimentation, localisée dans le réseau de galeries du Mont Terri (Figure 19), a consisté à instrumenter le front d'une ancienne galerie (galerie Ga04) afin de suivre l'évolution spatio-temporelle du front d'excavation de la nouvelle galerie Ga08 venant du côté opposé (galeries de section elliptique, axe d'environ 5 m).

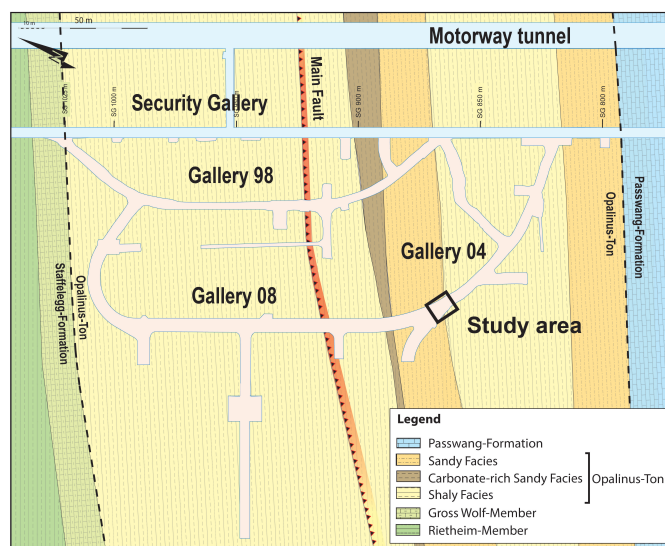


FIGURE 19 – Plan du laboratoire souterrain du Mont Terri (extrait de Le Gonidec *et al.* [60]) : le site du projet EZ-G08 est à la jonction des galeries Ga04 et Ga08, celui de la partie sismique du projet MOA se situant à travers la Main Fault en galerie Ga08.

30. URL : Underground Research Laboratory

31. EDZ : Excavation Damaged Zone

Durant deux semaines, l'excavation de Ga08 a été stoppée à une distance $L=8$ m de Ga04, laissant ainsi un segment de roche d'argilite dont les propriétés géomécaniques ont été perturbées lors du déconfinement. Cette redistribution des contraintes est à l'origine de l'EDZ qui est par conséquent contrôlée par plusieurs facteurs (Blümling *et al.* [4]), à savoir la lithologie, l'orientation de la galerie par rapport au champ de contraintes ou encore la structure stratifiée de la roche : la zone d'étude, affectée par des failles sub-parallèles aux plans de stratification de l'argilite, se situe à la jonction entre un faciès argileux côté Ga04 et un faciès sableux côté Ga08.

Les dispositifs de mesures acoustiques, insérés dans des forages de petit diamètre, ont nécessité d'importants développements instrumentaux pour répondre aux conditions de mesures *in situ* (Figure 20).

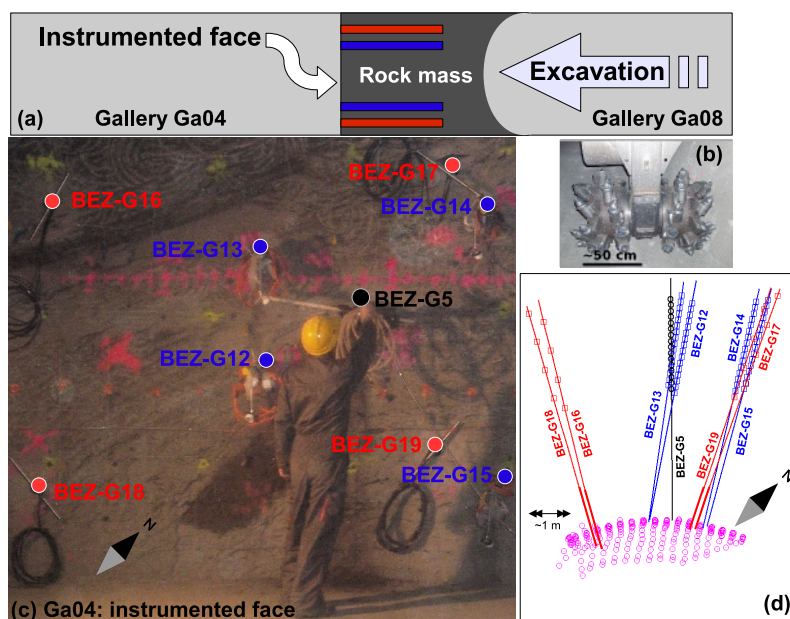


FIGURE 20 – (a) Schéma du processus d'excavation. (b) Outils d'excavation. (c) Photographie du fond de la galerie Ga04 indiquant les forages instrumentés. (d) Orientations des forages dans le segment de roche entre Ga08 et Ga04 (extrait de Le Gonidec *et al.* [61]).

Les forages, de 8 m de longueur réalisés depuis la face Ga04, ont permis de positionner les dispositifs de mesure au plus près de la face d'excavation Ga08, c'est à dire à proximité de la zone de déconfinement (Figure 20) :

- ▷ BEZ-G5 : une source acoustique omnidirectionnelle est positionnée entre 4.4 et 7.4 m par rapport à la face Ga04. Cette source acoustique contrôlée est une source piézo-électrique insérée dans une membrane étanche remplie d'huile sous pression afin d'assurer le couplage avec la paroi du forage (Figure 21, gauche) ;
- ▷ BEZ-G12 à BEZ-G15 : chaque forage est équipé d'une antenne de 16 capteurs avec un offset de 20 cm, conçus et réalisés à Géosciences Rennes (réseau de capteurs R1). Les capteurs ont été conçus pour être insérés dans des forages horizontaux de petits diamètres (56 mm), montés sur des ballons gonflés à l'air pour assurer le couplage avec la paroi (Figure 21, gauche) ;

- ▷ BEZ-G16 à BEZ-G19 : chaque forage est équipé d'une antenne de 4 capteurs avec un offset de 1 m, conçus par l'ENS (réseau de capteurs R2). Les transducteurs ont pu être insérés au moyen de réglettes et de ressorts plaquant leurs surfaces usinées contre la paroi des forages (Figure 21, droite) ;

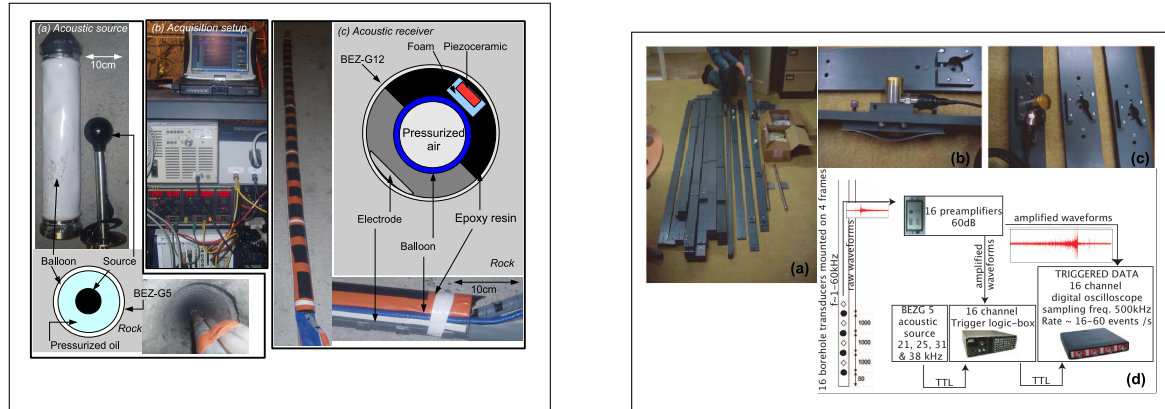


FIGURE 21 – (gauche) Source (a), acquisition (b) et réseau de capteurs acoustiques R1. (droite) Réseau de capteurs acoustiques R2 et acquisition (extrait de Le Gonidec et al. [61]).

Les expérimentations acoustiques portent sur des mesures de sondage acoustique et des détections de l'activité microsismique (David *et al.* [16], Falls and Young [21]). Pour les sondages acoustiques, des pulses d'ondelettes de fréquences ~ 30 kHz sont émis par la source contrôlée afin de sonder le segment de roche sous plusieurs angles par rapport à la stratification de la formation argileuse, les signaux étant mesurés sur les capteurs à la fois du réseau R1 et du réseau R2. Pour la détection de la microsismicité, les sources acoustiques sont liées à des pertes de cohésion de la roche environnante qui produisent de l'énergie élastique dans la roche associée à des émissions acoustiques mesurées sur les capteurs du réseau R2. La localisation de ces événements microsismiques n'est pas connue *a priori* et nécessite la connaissance du modèle de vitesse du segment de roche qui peut être déterminé à partir des sondages acoustiques, d'où le complément entre ces deux expérimentations d'acoustique active et passive.

Il est important de souligner que ces travaux de recherche menés en conditions *in situ* présentent des difficultés liées aux dispositifs expérimentaux mis en œuvre et à l'exploitation de la base de données acquise. En effet, nous avons conçu des dispositifs non conventionnels afin de pouvoir les adapter aux contraintes du terrain dont les conséquences sur la qualité des mesures est à considérer pour la valorisation des données, notamment en terme de publication scientifique. La base de données acoustiques, très volumineuse comme nous le verrons par la suite, a nécessité d'importants investissements en terme de traitements³² et d'interprétations des processus mis en jeu.

De telles expérimentations acoustiques en formation argileuse sont très peu répandues dans la littérature, ce qui renforce à la fois l'originalité et l'intérêt des investissements qui ont été nécessaires aux résultats obtenus présentés ci-dessous.

³². Le traitement des données acoustiques a été initié en collaboration avec le laboratoire de géologie de l'ENS (Paris) pour l'utilisation du logiciel *Insite* (ASC Ltd.) utilisé en laboratoire pour la mécanique des roches, puis avec le CSIRO (Perth, Australie).

III.2 Sondages acoustiques du segment de roche

III.2.1 Modifications du champ proche du forage BEZ-G5

Les sondages acoustiques consistent à mesurer, sur les capteurs fixes durant l'expérience, les signaux transmis par la source active contrôlée. Deux protocoles de mesures sont réalisés. Le premier réalise quotidiennement des sondages complets où la source est successivement repositionnée à différentes profondeurs dans BEZ-G5 : le repositionnement de la source perturbe les conditions expérimentales. Entre deux sondages complets, le second protocole réalise automatiquement un sondage toutes les deux heures sans repositionnement de la source : 13 séries de sondages sont ainsi enregistrées sur les capteurs du réseau R1 pour une source positionnée à 6.8 m de Ga04. Dans ce cas, chaque série correspond à une installation fixe du dispositif et toute perturbation des signaux transmis peut alors être reliée soit à des effets de couplage de la source avec la paroi du forage, soit à des modifications du milieu de propagation, ce qui permet d'en suivre l'évolution au cours du temps.

Pour cela, nous utilisons l'énergie du signal transmis comme un proxy des modifications du milieu. Sur l'un des capteurs du réseau R1, nous observons que chaque série présente une forte augmentation du proxy au début qui tend à se stabiliser avec le temps (Figure 22a). Nous attribuons cette fluctuation d'énergie transmise à des réinitialisations de couplage mécanique entre la source et le forage induites lors du repositionnement de la source en début de chaque série de mesures (Le Gonidec *et al.* [61]).

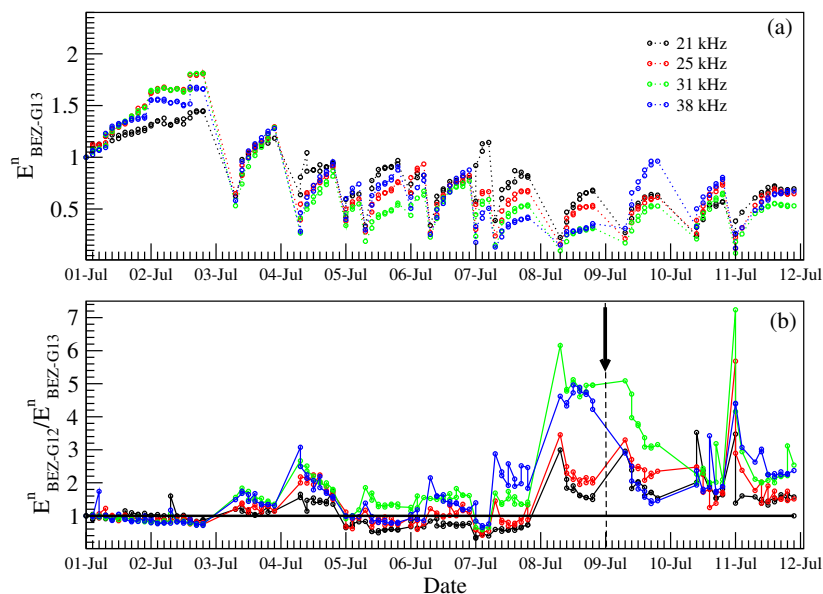


FIGURE 22 – (a) Variations temporelles de l'énergie acoustique mesurée sur un capteur pour une source repositionnée plusieurs fois à la profondeur de 6.8 m dans le forage BEZ-G5. (b) Rapport des énergies mesurées en 2 points différents, avec un maximum localisé au moment où l'excavation arrive à 2.5m de l'extrémité du forage (extrait de Le Gonidec *et al.* [61]).

La source active étant omnidirectionnelle, nous supposons que cet effet dû au couplage est identique pour l'ensemble des points de mesure, ce que nous vérifions sur un capteur positionné à l'opposé du précédent par rapport à BEZ-G5. Dans ce cas, le rapport des proxy

mesurés par ces deux capteurs permet alors de s'affranchir des effets de couplage et de mettre ainsi en évidence les variations propres au milieu (Figure 22b). Ces variations apparaissent essentiellement entre les 8 et 9 juillet, deux jours avant l'arrêt de l'excavation lorsque le front de la galerie Ga08 atteint l'extrémité de BEZ-G5 : cette analyse met en évidence le suivi temporel de l'endommagement dû à des effets de collapse du forage (Le Gonidec *et al.* [61]).

III.2.2 Modèle anisotrope transverse du champ de vitesse du segment de roche

A partir du temps mis par le signal acoustique pour se propager depuis la source jusqu'aux capteurs, le champ de vitesse des ondes acoustiques de compression V_p peut être mesuré pour différentes directions de propagation relativement au plan de stratification de la formation argileuse. Sur les deux semaines de mesures qui ont suivi l'arrêt de l'excavation, les mesures de sondages acoustiques réalisées sur les 16 capteurs du réseau R2 placés dans les forages extérieurs (BEZ-G16 :19) ont permis de déterminer ce champ de vitesse à l'échelle du segment de roche, c'est à dire son modèle de vitesse V_p . Les repositionnements successifs de la source ont induit des incertitudes sur les distances de propagation qui n'ont pas permis d'observer d'éventuelles modifications temporelles de V_p . A partir des mesures de vitesse calculées pour différentes directions de propagation, nous mettons en évidence la structure anisotrope du milieu (Figure 23).

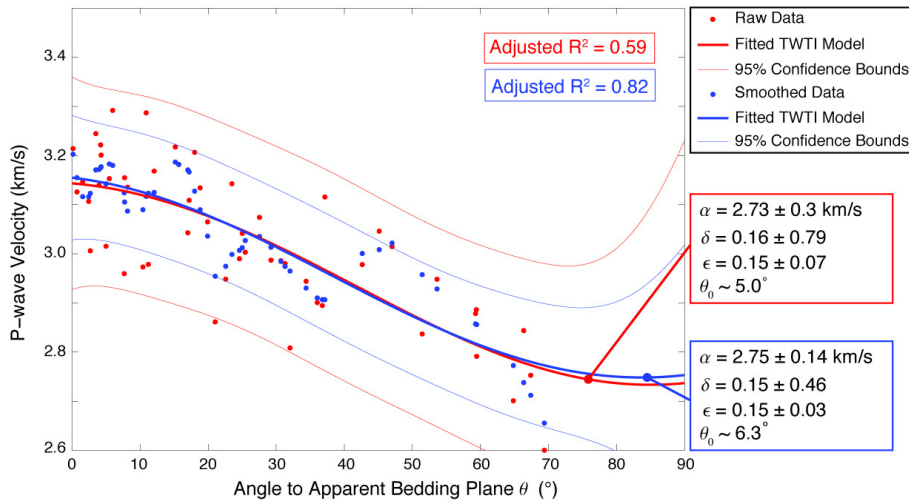


FIGURE 23 – Vitesses V_p des ondes compressives mesurées *in situ* en fonction de l'angle de propagation pris relativement à la stratification de la formation argileuse et paramètres associés renseignés à partir du modèle de Thomsen [81] (extrait de Le Gonidec *et al.* [61]).

Les caractéristiques de ce champ de vitesse isotrope transverse du segment de roche sont quantifiées à partir des paramètres extraits du modèle de Thomsen [81] appliqué aux mesures *in situ*. Nous identifions notamment une vitesse maximale $V_p = 3300ms^{-1}$ dans le plan de stratification et une vitesse minimale $V_p = 2750ms^{-1}$ perpendiculaire à la stratification du massif.

III.2.3 Processus de localisation validé par les sources contrôlées

Le modèle de vitesse du segment de roche étudié est maintenant bien défini. Les différentes positions occupées par la source active dans BEZ-G5 étant connues, ainsi que les temps de parcours suivant les différents rayons de propagation acoustique, nous nous intéressons ici à la localisation spatiale dont nous cherchons à valider l'algorithme utilisé à partir des données de sondages acoustiques, l'objectif qui suivra étant de localiser des sources acoustiques dont les positions sont inconnues *a priori*.

Pour cela, nous utilisons l'algorithme itératif d'inversion basé sur la méthode du Downhill Simplex implémenté dans le logiciel *Insite* (ASC Ltd.) (Nelder and Mead [72], Pettitt *et al.* [77]). Nous le paramétrons à partir des résultats *in situ* obtenus dans la section précédente sur le champ de vitesse isotrope transverse du segment de roche et nous vérifions les performances du processus de localisation spatiale des sources actives au niveau des différentes positions d'émissions contrôlées.

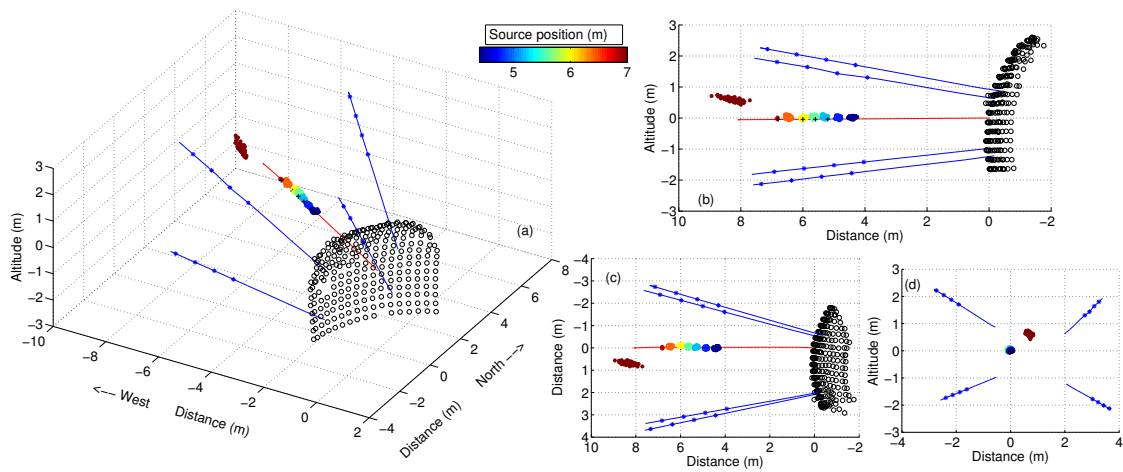


FIGURE 24 – Localisation spatiale des sondages acoustiques (couleurs bleu-rouge) et des émissions acoustiques induites lors d'un forage (marron) dans le segment de roche vu sous différents angles : le face Ga04 (ronds noirs) ainsi que les forages BEZ-G16 :19 (segments bleus) sont représentés (extrait de Le Gonidec et al. [60]).

Nous observons un alignement des points localisés sur l'axe du forage BEZ-G5 dans lequel est insérée la source active : ces points se répartissent en sept ensembles distincts, chacun bien localisé sur les différentes positions successives occupées par la source (Figure 24). Les résultats mettent ainsi clairement en évidence une bonne localisation des sources actives contrôlées avec une incertitude d'environ 20 cm sur leur localisation.

D'autres sources anthropiques d'évènements acoustiques ont également pu être enregistrés, avec des positions connues *a priori* : il s'agit du bruit généré lors d'un forage dans la face Ga08. Nous nous sommes donc intéressés à localiser ces mesures en suivant l'approche précédente, appliquée ici sur des signaux non contrôlés. Les résultats montrent que ces évènements se localisent de manière cohérente près du front d'excavation, alignés dans l'axe du

forage. Ceci valide bien le procédé d'inversion et le champ de vitesse utilisé en conditions *in situ* pour des signaux naturels et souligne le potentiel de la méthode pour localiser des événements liés à la microsismicité induite par le processus d'excavation dont la localisation n'est pas connue *a priori*.

III.3 Microsismicité induite par le processus d'excavation

III.3.1 Identification de l'activité microsismique

Durant la campagne de mesure de l'expérimentation EZ-G08, plus de 56 000 événements répondant aux critères de détection fixés (niveau d'amplitude suffisant sur un nombre minimum de capteurs) ont été enregistrés sur le réseau R2 de 16 capteurs (Figure 20, forages rouges) : tous ne sont pas d'origine acoustique ou microsismique. Dans un premier temps, la quantité et la complexité des signaux ont nécessité un traitement manuel des données, acquises au format propriétaire du logiciel associé *Insite* (ASC Ltd.). A partir de cette étape préliminaire de préparation des données, très longue et fastidieuse mais indispensable pour une première interprétation des données, quelques milliers d'événements acoustiques ont été retenus pour leur bon rapport signal-sur-bruit nécessaire pour pouvoir les localiser correctement. Le résultat de la localisation rend compte d'une zone d'activité acoustique concentrée au niveau du front d'excavation (Figure 25). Cependant, ces événements correspondent essentiellement à des événements induits par le processus d'excavation.

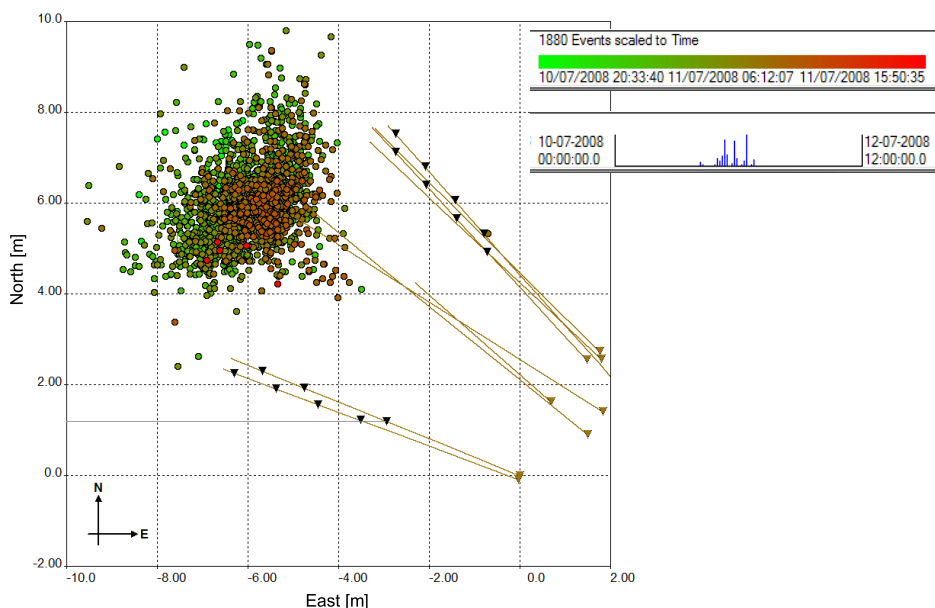


FIGURE 25 – Localisation des émissions acoustiques identifiées manuellement (extrait de Le Gonidec et al. [61]).

Afin de pouvoir identifier les événements liés à la microsismicité induite par redistribution des contraintes, appelés par la suite *événements microsismiques* (EMs), nous avons développé un algorithme de sélection multicritère non disponible dans le logiciel de traitement : le filtrage se fait sur la base du contenu fréquentiel des signaux, du rapport signal-sur-bruit et de la date de l'évènement. L'efficacité de ce filtre très sélectif, qui a l'avantage de retenir avec confiance

les EMs sur lesquels s'appuiera l'interprétation des données, est illustrée sur la Figure 26 où les événements bruts de la base de données (noir) ne présente aucune correspondance avec les opérations d'excavation (calendrier en bleu).

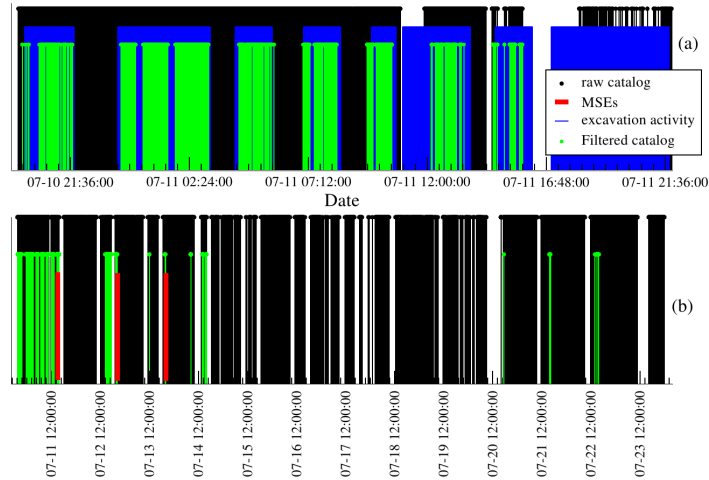


FIGURE 26 – Calendrier des opérations d'excavation (en bleu), des événements bruts (en noir), filtrés (en vert) et ceux correspondant à des événements microsismiques (en vert) (modifié de Le Gonidec et al. [60]).

Le rejet des données de bruits, c'est à dire les enregistrements sans événement notable ou non exploitable, fait ressortir l'existence d'évènements acoustiques synchronisées (en vert) avec les travaux d'excavation (bleu) (Figure 26a). En approchant de la période d'arrêt des travaux, nous observons quelques événements (Figure 26b) et certains sont même identifiés après l'arrêt complet de l'excavation. Au final, il en ressort trois périodes d'émissions d'évènement microsismiques (en rouge) : la première se situe en fin de période d'excavation (11 juillet) et les deux suivantes ont lieu jusqu'à deux jours après l'arrêt des opérations d'excavation (12 et 13 juillet, respectivement).

Ce résultat présente une importance particulière en ce qui concerne les expérimentations acoustiques *in situ* menées en formation argileuse dans la mesure où il n'existe pratiquement aucun résultat publié dans la littérature sur le sujet. Ceci souligne l'intérêt de l'article Le Gonidec *et al.* [60] inséré en annexe comme référence des résultats décrits dans cette partie de synthèse.

III.3.2 Localisation spatiale des événements microsismiques

Dans cette section, nous présentons les résultats de localisation spatiale des événements de la base de données d'acoustique passive identifiés comme étant des EMs. La procédure de localisation est celle que nous avons mise au point à partir des mesures de sondages acoustiques (Section III.2.3), c'est à dire même modèle du champ de vitesse et même algorithme de localisation. Les résultats de la localisation spatiale des EMs sont présentés selon différentes vues du segment de roche pour une meilleure interprétation (Figure 27) : dans ce soucis de clarté des résultats, les forages (BEZ-G16 :19 en bleu, BEZ-G5 en rouge), les positions des capteurs acoustiques du réseau R2 (étoiles bleues), les faces Ga08 (surface rouge) et Ga04 (points de mesure de la topographie en noir) sont également précisés.

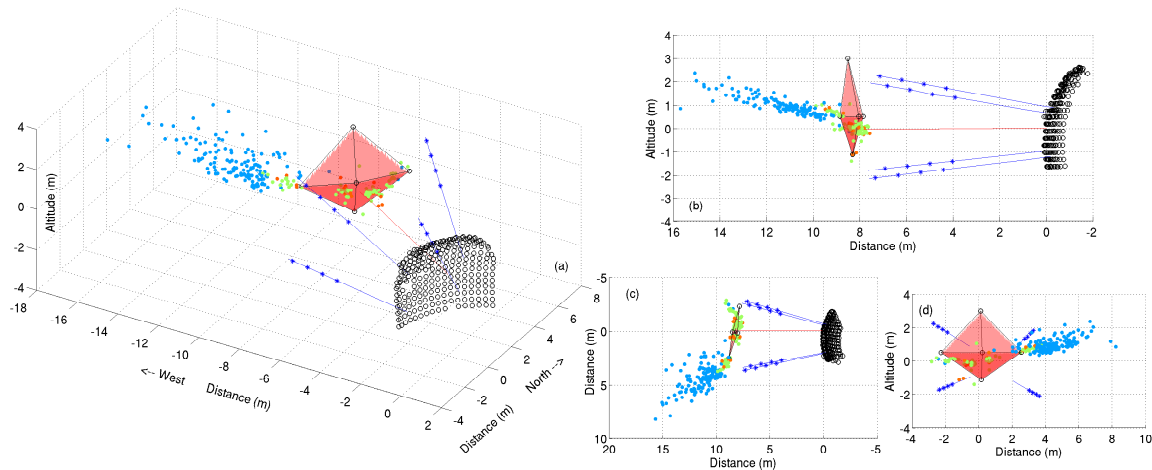


FIGURE 27 – Localisation spatiale des évènements microsismiques identifiés le 11 juillet (bleu), le 12 juillet (vert) et le 13 juillet (rouge) juillet. Les segments colorés représentent les forages, les surfaces rouge et noire représentent respectivement l'emplacement des faces Ga08 et Ga04 (extrait de Le Gonidec et al. [60]).

Les évènements microsismiques du 11 juillet (bleu), très localisés dans le temps, se localisent spatialement dans la paroi droite face au front d'excavation Ga08 (Figure 27) : l'étalement spatial des données alors observée est en partie due à l'avancée de l'excavation alors en fin de progression. Il est important de noter la forte dissymétrie de la localisation de ces évènements : aucun évènement n'est détecté dans la paroi opposée, située dans un faciès différent, à savoir un faciès sableux pour lequel le seuil d'initiation de fissuration est plus élevé.

Les évènements microsismiques des 12 et du 13 juillet (vert et rouge, respectivement) sont localisés de manière similaire au voisinage du front d'excavation (Figure 27). Leur distribution spatiale se divise en deux clusters localisés d'une part sur le front d'excavation et d'autre part à l'intérieur de la paroi argileuse située à droite du front Ga08. Ces EMs semblent par conséquent répondre à un même processus géomécanique et nous montrons dans la section suivante (Section III.4) que les analyses de mécanismes d'endommagement vont dans ce sens et permettent d'approfondir ce résultat.

III.4 Mécanismes de l'endommagement

A partir de la base de données brutes d'évènements acoustiques enregistrés, nous avons identifié quelques centaines d'évènements microsismiques seulement, dont moins de 300 ont pu être localisés de manière satisfaisante (Figure 27). Pour aller plus loin dans l'exploitation de ces données uniques, nous nous sommes intéressés aux mécanismes d'endommagement associés aux MSEs, étape peu souvent menée à son terme en particulier avec des expérimentations *in situ*. En effet, il est nécessaire que l'évènement analysé présente des formes d'onde avec de bons rapports signal-sur-bruit, ce qui n'est pas évident dans le cas de mesures acous-

tiques effectués en formation argileuse caractérisée par une faible activité microsismique et une forte atténuation.

Le mécanisme d'endommagement lié à un évènement microsismique nécessite de pouvoir identifier, sur les formes d'onde, les premiers mouvements des ondes de compression (temps d'arrivée, amplitude et polarisation) nécessaires à la méthode d'inversion du tenseur des moments, une approche intégrée dans le logiciel *Insite* (ASC Ltd.) (Pettitt [76], Young *et al.* [87]). Parmi les MSEs détectés, ceux du 11 juillet et certains du 12 et 13 juillet sont associées à des formes d'onde non exploitables pour mener à bien cette étude : au final, l'étude du mécanisme de l'endommagement a pu être menée pour seulement 61 EMs. Par défaut dans *Insite*, le mode de représentation des mécanismes est le diagramme T-k d'Hudson [35] où le mécanisme de dilatation pure (mode ISO) correspond à $(T,k)=(0,1)$, le mode "compensated linear vector dipole" (CLVD) à $(T,k)=(-1,0)$, et le mode "double-couple" pur (DC) à $(T,k)=(0,0)$: un ellipsoïde d'erreur représente la validité du mécanisme identifié dont la proportion des composantes ISO, DC et CLVD sont données en pourcentage. Pour aller plus loin dans ces représentations, nous avons extraits ces résultats d'*Insite* et converti ces proportions de modes en niveaux de couleurs RGB, ce qui permet de rendre compte du mode dominant pour chaque évènement microsismique que nous pouvons ainsi replacer dans l'espace des localisations spatiales (Figure 28).

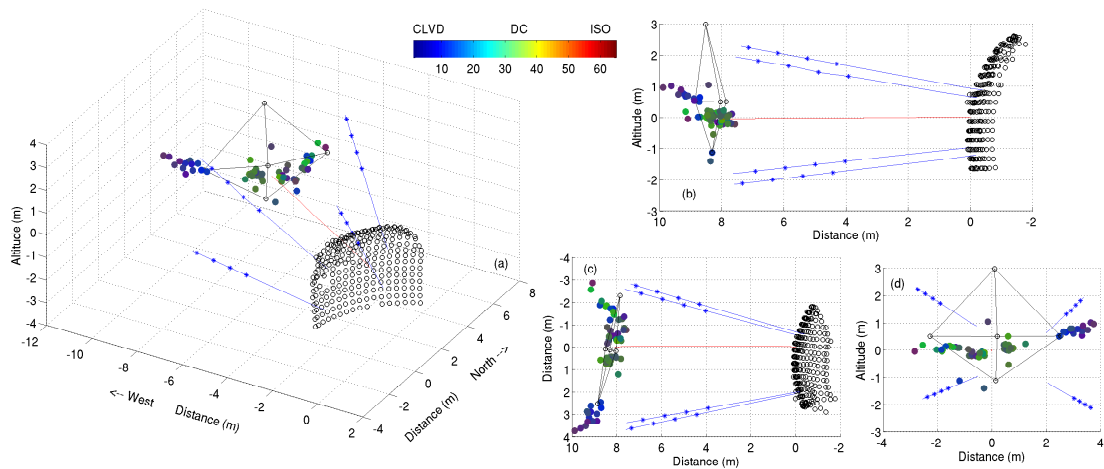


FIGURE 28 – Mécanismes de la source de 68 EMs localisés au voisinage du front d'excavation : les composantes DC et CLVD sont prépondérantes respectivement sur le front d'excavation et dans la paroi du faciès argileux (extrait de Le Gonidec *et al.* [60]).

Ces résultats d'analyse mettent en évidence une répartition non aléatoire des mécanismes d'endommagement qui peuvent être regroupés en deux clusters distincts : les EMs localisés sur le front d'excavation correspondent à un mode DC dominant, alors que ceux localisés dans la paroi argileuse correspondent à un mode CLVD dominant. Il est intéressant de noter que ces résultats sont similaires pour les EMs du 12 et du 13 juillet, ce qui conforte l'observation précédente : un même processus géomécanique semble bien s'être produit de manière

similaire jusqu'à deux jours après l'arrêt de l'excavation. Passé ce délai, plus aucun événement microsismique n'a été détecté. Ceci met en évidence l'existence d'une corrélation entre la distribution spatiale et la distribution temporelle des EMS induits par la redistribution des contraintes, ainsi qu'une corrélation avec le mécanisme d'endommagement. Le mode DC domine sur le front d'excavation : ceci suggère de la fracturation en mode extensif en bon accord avec la réactivation des plans de stratification et des failles subparallèles pré-existantes susceptibles de glisser sur cette surface libre, avec l'apparition notamment de *wing cracks*. Quant au mode CLVD, il est dominant pour les MSEs localisés dans la paroi de faciès argileux où la stratification et les structure pré-existantes ne sont pas libres de glisser : étant donnée la direction verticale de la contrainte maximum, des fissures sont susceptibles d'être créées en *axial splitting*.

III.5 Discussion et conclusion

Le monitoring acoustique d'une EDZ durant et après l'excavation d'une galerie dans la formation argileuse du Mont Terri a permis d'acquérir une base de données d'acoustique active et passive unique et riche. Ceci a nécessité d'importants investissements pour pouvoir faire ressortir des informations originales dans ce type de formation géologique et ainsi pouvoir les valoriser. D'une part, les données de sondages acoustiques ont permis de mettre en évidence l'anisotropie du champ de vitesse des ondes de compression, modèle utilisé dans un premier temps pour développer l'approche de localisation spatiale des sources acoustiques contrôlées. D'autre part, quelques événements microsismiques liés à la redistribution des contraintes au voisinage du front d'excavation ont été identifiés et localisés à la fois sur le front et dans la paroi. L'analyse du mécanisme d'endommagement a mis en évidence des modes dominants DC et CLVD, respectivement, suggérant une fracturation en *wing cracks* et en *axial splitting*. Ces travaux ont permis d'établir un schéma de la distribution de l'EDZ au voisinage de la galerie (Figure 29), résultats qui sont actuellement en cours de valorisation.

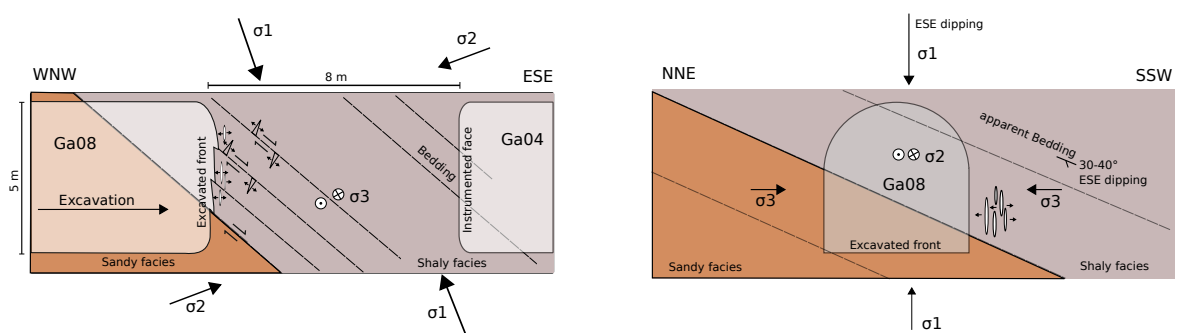


FIGURE 29 – Représentation des processus de fracturation au voisinage d'une galerie (extraite de Le Gonidec et al. [60]) : (a) vue latérale depuis la paroi argileuse (modifiée de Nussbaum et al. [74]) et (b) vue face au front d'excavation.

Ces travaux ont ainsi conduit à des résultats et des valorisations d'expérimentations acoustiques conduites *in situ* en formation argileuse, données peu disponibles dans la littérature. Ces résultats viennent ainsi combler le manque d'observation sur la redistribution des contraintes induites par une excavation de galerie et renseignent de manière originale sur

l'initiation, l'extension et l'évolution spatio-temporelle d'une EDZ. Cette étude fait actuellement l'objet d'une valorisation supplémentaire à travers une publication en préparation³³ où ces résultats *in situ* servent de paramètres d'entrée d'une modélisation géomécanique du processus d'excavation mise en œuvre durant l'expérimentation : un très bon accord est mis en évidence entre ces deux approches complémentaires, mais également en comparaison à des résultats d'expériences réalisées en laboratoire sur des échantillons de roche.

BILAN DE CES TRAVAUX EN QUELQUES POINTS

- ▷ Conception et réalisation d'expérimentations *in situ* de mesures acoustiques/sismiques en formation argileuse ;
- ▷ Investissement à long terme pour optimiser l'exploitation des données acquises ;
- ▷ Résultats originaux qui viennent combler le manque de données sur la microsismicité induite en milieux argileux ;
- ▷ Perspectives de valorisation complémentaires : modélisation numérique associée aux expériences de terrain, expériences de laboratoire sur presse triaxiale.
- ▷ Animation de projets de recherche : porteur de projets, coordination entre les partenaires, organisation de réunions de travail, etc. ;
- ▷ Collaborations nationales et internationales (GEC, IPGP, ENS, Swisstopo, CSIRO) ;
- ▷ Publications de rang A.

33. Amann *et al.*. "Geomechanical analysis of micro-seismic events recorded during a mine-by experiment at the Mont Terri Underground Research Laboratory". In : (préparation)

Perspectives de recherche

Introduction

La partie précédente de synthèse de mes travaux de recherche met en évidence la réalisation de projets très variés, tous articulés autour de l'acoustique et d'objets d'étude de systèmes complexes en Géosciences. Le titre de ce travail est d'ailleurs basé sur cette cohérence, approche multidisciplinaire qui a pu être valorisée par un certain nombre de publications et de collaborations nationales et internationales.

Plusieurs autres projets, en attente d'être valorisés ou envisagés, constituent mes perspectives de recherche : par soucis de clarté et à nouveau de cohérence de présentation, la liste retenue n'est cependant pas exhaustive. C'est par exemple le cas de mes travaux *in situ* au Mont Terri pour lesquels mon investissement se poursuit par des expérimentations en laboratoire sur des échantillons d'argilite : un article³⁴ en préparation illustre l'activité maintenue dans ce domaine bien que n'apparaissant pas explicitement par la suite. La présentation de mes perspectives de recherche reste structurée suivant les trois thèmes identifiés pour la synthèse et concernent :

- ▷ la propagation acoustique : effet de la mobilité des grains sur la réponse multiéchelle d'un milieu granulaire ;
- ▷ l'imagerie acoustique : caractérisation multifréquence de réflecteurs océanographiques ;
- ▷ le monitoring acoustique : dynamique du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe.

Propagation acoustique : effet de la mobilité des grains sur la réponse multiéchelle d'un milieu granulaire

Cette perspective s'inscrit dans la continuité des travaux initiés dans le cadre du projet ANR STABINGRAM et porte sur des aspects à la fois de simulation et d'expérimentation acoustiques pour mieux comprendre la propagation d'une onde acoustique dans un milieu granulaire immergé.

Du point de vue simulation, le code de propagation d'onde acoustique dans un milieu granulaire immergé mis au point par D. Imbert [37] est actuellement le seul permettant de contrôler l'interaction entre l'onde acoustique et les grains : les grains peuvent être mobiles ou fixes, c'est à dire que l'onde incidente peut ou non déclencher leur mise en mouvement. J'envisage d'étudier cet effet sur la réflectivité acoustique multiéchelle, en particulier à partir de la réponse en ondelettes qui reste à intégrer dans la simulation pour permettre une meilleure interprétation des expériences réalisées en cuve acoustique, notamment en terme de modèles dynamiques de milieux effectifs.

Du point de vue expérimentation, j'envisage trois développements principaux à réaliser sur des milieux granulaires immergés. Le premier concerne l'identification des contributions de diffusion acoustique de volume et de surface d'un empilement granulaire statique : cette perspective est motivée par la problématique de caractérisation acoustique des fonds marins par sondeurs multifaisceaux et de diffuseurs de subsurface par profileurs de sédiments très

34. Sarout, J., Y. Le Gonidec, A. Ougier-Simonin, A. Schubnel, Y. Guéguen, and D. N. Dewhurst, Microseismic signature of shear faulting and fault slip in shale from laboratory investigations, en préparation

haute résolution. Le second développement concerne le cas dynamique d'une déstabilisation gravitaire où le protocole expérimental actuel présente certains verrous que des résultats préliminaires prometteurs ont permis d'identifier : en particulier, l'accès au champ acoustique réfléchi moyen est nécessaire à la caractérisation par réponse en ondelettes. Ces sondages acoustiques actifs seront complétés de mesures passives d'émissions acoustiques induites par les réarrangements de grains : les premiers résultats présentés en Section I.2 montrent l'intérêt de poursuivre dans cette voie afin d'identifier certains attributs acoustiques (énergie acoustique émise, durée des processus, récurrence des précurseurs, etc.) en lien avec le régime d'avalanche et le rôle joué par la présence de la phase fluide. Ce volet s'inscrit sur des problématiques du GdR TranSNat³⁵ et notamment sur les précurseurs d'avalanches, qu'il s'agisse d'instabilités de milieux granulaires en laboratoire ou de glissements de terrain *in situ* (Helmstetter and Garambois [31], Hibert *et al.* [32]).

Une autre perspective d'étude concerne la caractérisation acoustique d'une suspension granulaire en terme de concentration et de granularité, paramètres fondamentaux requis dans un contexte plus large d'études géomorphologies et de transport solide, en rivière par exemple. Actuellement, un instrument de mesure commercialisé intègre un processus de rétrodiffusion acoustique et un traitement sur trois fréquences (Hurther *et al.* [36], Moate and Thorne [69]). Pour aller plus loin dans cette approche, limitée par une chaîne d'acquisition et de traitement non configurable, la réponse en ondelettes est envisagée pour contribuer à répondre à cet objectif, approche qui sera étendue au dispositif expérimental en cours de conception dans le projet DEXMES³⁶. A noter que ces études de laboratoire dans un premier temps vont pouvoir bénéficier de systèmes d'imagerie acoustique *in situ* qui seront acquis dans le cadre du dernier CPER (sonar latéral, sondeur de sédiments et profileur haute fréquence).

Imagerie acoustique : caractérisation multifréquence de réflecteurs océanographiques

La récente publication sur l'exploitation de la réponse en ondelettes pour caractériser la réflectivité sismique de thermoclines (Ker *et al.* [46]) motive déjà l'exploitation de méthodes multiéchelles en océanographie physique côtière (Bornstein *et al.* [6], Piété *et al.* [78]), menées conjointement avec les équipes GM et le LPO de l'IFREMER. Dans la continuité de ces travaux sur des interfaces océanographiques, nous allons travailler sur une série temporelle de thermoclines détectées au moyen de flotteurs profilants autonomes capables de mesurer à la fois la température et la salinité le long de la colonne d'eau, paramètres pouvant renseigner sur les processus de mélange et de stratification. Les vitesses de propagation acoustique peuvent être déterminées et la présence de contrastes permettre aux ondes acoustiques d'être réfléchies et mesurées. Les profils sismiques synthétiques ainsi obtenus seront exploités pour une analyse multiéchelle des réflecteurs dynamiques afin d'aborder de manière statistique leur détectabilité sismique en fonction de la complexité de leur morphologie. L'analyse des variations spatio-temporelles de ces profils lagrangiens, qui constituent un catalogue de ther-

35. GdR TranSNat : Groupement de Recherche "Transport Solide Naturel"

36. DEXMES : "Dispositif expérimental de quantification des matières en suspension", projet EC2CO (Ecosphère Continentale et Côtière,) porté par le laboratoire DYNECO/PHYSED de l'IFREMER

moclines *in situ* caractéristiques, sera basée sur les nouveaux attributs sismiques multiéchelles développés précédemment. Ces études pourront contribuer à la conception et au dimensionnement d'expériences sismiques en mer pour localiser en particulier la base de la thermocline et l'épaisseur de la couche de mélange qui constitue une importante surface d'échange couplée à des processus externes d'origine atmosphérique.

En effet, l'interface océan-atmosphère est une interface dynamique pouvant être fortement turbulente par l'existence de forçages externes comme le vent. L'état de la mer, accessible à grande échelle *via* la télédétection satellitaire, influe sur les processus de mélange des masses d'eau et par conséquent sur les structures océanographiques. Une perspective d'étude porte sur la caractérisation acoustique locale de ces interfaces turbulentes, initiée en collaboration avec IFREMER par une approche expérimentale sur le dioptré air-eau : l'objectif est d'étendre la caractérisation acoustique multiéchelle à l'interface dynamique entre deux milieux homogènes fluides, configuration qui se rapprocherait des structures océanographiques.

Monitoring acoustique : dynamique du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe

Les méthodes géophysiques conventionnelles (sismique active, électrique, etc.) associées à des tests ponctuels en forage (hydrauliques, mesures de contraintes, etc.) ont permis d'importantes avancées en terme d'imagerie quantitative de milieux géologiques de subsurface. Depuis quelques années, l'exploitation de sources naturelles comme le bruit sismique ambiant connaît un fort intérêt d'investigation (Brenguier *et al.* [8], Campillo and Paul [10], Gouedard *et al.* [28]). Ma première approche dans ce domaine se fait à travers le projet MOA dont l'objectif est d'utiliser le bruit ambiant à l'échelle de l'URL Mont Terri (une extension est d'ailleurs prévue dans le projet METRICs³⁷ soumis à l'ANR). Les enregistrements acquis jusqu'à présent serviront de mesures de référence pour suivre les perturbations induites lors de la réactivation de la faille majeure prévue prochainement³⁸ – effets hydromécaniques, microsismicité induite, ou encore contraintes mécaniques *in situ* (Derode *et al.* [19], Jeanne *et al.* [40]). Cette étude à venir permettra d'aborder l'exploitation du bruit sismique ambiant sur un système contrôlé, à savoir une faille réactivée. Mais c'est essentiellement sur un autre système que mes perspectives de recherche sur le monitoring acoustique vont se développer : il s'agit du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe.

Le dôme de ce volcan, qui a connu sa dernière éruption phréatique en 1976 et actuellement en état de repos éruptif, présente une activité fumerollienne croissante qui motive la nécessité d'en assurer la surveillance, notamment ses changements de dynamique interne. Durant un précédent projet ANR (DOMOSCAN), j'ai pris connaissance de ce système complexe à la fois par sa structure interne et par son fonctionnement, animé par d'importants flux thermiques dont les fluctuations temporelles peuvent renseigner sur l'état du système. Dans l'actuel projet ANR (DIAPHANE), centré sur la tomographie du volcan par rayons cosmiques (Gibert *et al.*

37. METRICs : Magnetic and Earth Tides Reservoir Characterization, sustainable methods to study transport properties in low permeability rocks

38. FS experiments : "In-situ faults slip hydromechanical characterisation", porté par le CEREGE et Swisstopo

[23], Marteau *et al.* [66]), je contribue au monitoring géophysique de ce système complexe au sein duquel co-existent plusieurs sous-systèmes couplés.

Jusqu'à présent, les expérimentations *in situ* localisées sur les zones actives du volcan n'ont pas pu être valorisées en terme de publications scientifiques, ce qui souligne la complexité à la fois du système et des conditions extrêmes de mesures. C'est notamment le cas d'expérimentations acoustiques réalisées dans une des sources actives du système, le gouffre *Tarissan*, où un lac d'acide en ébullition évacue une importante quantité d'énergie thermique renfermée au sein du système (Figure 30a).

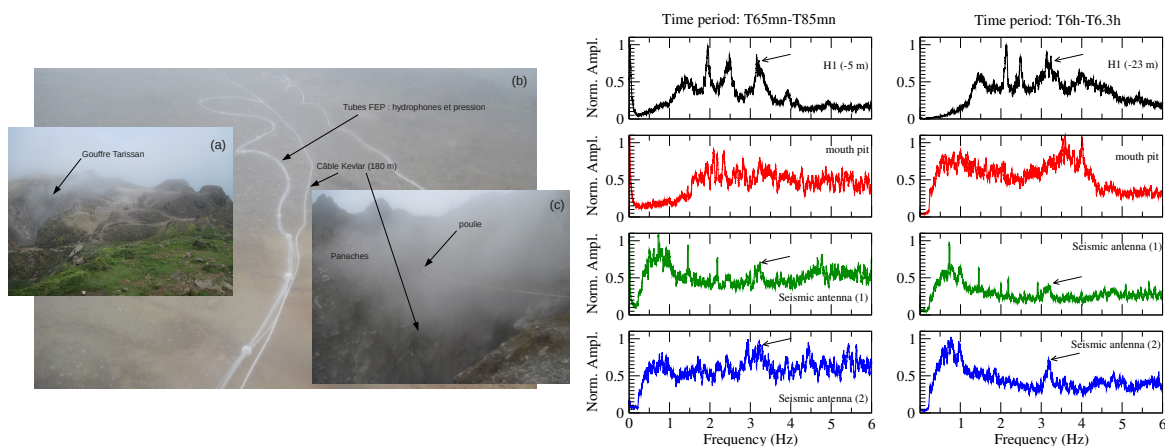


FIGURE 30 – Gauche : (a) Zones active du sommet de la Soufrière, avec le gouffre *Tarissan* au fond duquel se trouve un lac d'acide en ébullition. (b) Dispositif expérimental composé de deux hydrophones et d'un capteur de pression. (c) Mise en place du dispositif dans le gouffre. Droite : Spectres des signaux mesurés par les différents dispositifs de mesure : hydrophone H1 immergé dans le lac et stations sismiques positionnées en différents endroits sur le dôme du volcan.

Les conditions extrêmes de mesures *in situ* dans ce lac, situé à 80 m de profondeur, nécessitent de mettre au point des expérimentations difficiles à maintenir dans le temps. Nous avons conçu un premier dispositif d'enregistrement du bruit émis par les bulles du lac (Figures 30b-c) puis déployé, en collaboration avec des chercheurs d'Isterre, une station sismique à proximité du gouffre ainsi qu'une antenne multicapteurs plus loin sur le flanc du dôme : l'objectif était de pouvoir identifier le bruit des bulles sur des enregistrements réalisés à distance dans des contextes moins extrêmes.

Dans la continuité de ces expériences préliminaires, mes perspectives de recherche portent sur des méthodes acoustiques de monitoring de plusieurs zones actives afin d'étudier le couplage entre ces différents sous-systèmes. Pour cela, plusieurs dispositifs de mesures acoustiques et sismiques sont en cours de conception et réalisation. Parmi ces dispositifs, trois réseaux de 8 géophones chacun (verticaux, 4.5 Hz), synchronisés sur une même station d'acquisition, vont permettre d'enregistrer le bruit sismique ambiant sur trois sous-systèmes actifs du dôme. L'analyse de ces mesures continues portera sur l'exploitation de la méthode SPAC³⁹, introduite par Aki [1] et largement reprise depuis pour des études de microzonage sismique (Apostolidis *et al.* [2], Foti *et al.* [22]). Il s'agira d'établir l'imagerie de subsurface à partir des

39. SPAC : SPatial AutoCorrelation

ondes de surface pour déterminer les profils de vitesse V_s des ondes de cisaillement des trois sites retenus. La profondeur d'investigation devrait permettre d'atteindre la zone non saturée caractérisée par des infiltrations de fluides et des remontées d'eau sous forme vapeur : les propriétés de ce milieu multiphasique complexe (coexistence de phases solide, liquide et gazeuse) contrôlent fortement V_s dont les fluctuations temporelles renseigneront sur la dynamique du système. A ces mesures continues s'ajouteront des mesures plus ponctuelles réalisées sur un sismomètre large bande dont l'enregistrement selon les trois composantes (deux horizontales H et une verticale V) permettront d'identifier des effets de site par la méthode de rapport de spectres H/V (Bonney-Claudet *et al.* [5], Konno and Ohmachi [49], Mahajan *et al.* [62], Nakamura [71]). Cette méthode est utilisée sur des zones tabulaires telles que les dépôts sédimentaires où l'existence d'une épaisseur caractéristique de nature peu consolidée induit des effets de site identifiables. Dans le cas du dôme volcanique, l'objectif est d'identifier cet effet de site associé, potentiellement induit par l'épaisseur de la zone non saturée.

Ces expérimentations *in situ*, qui seront assurées sur plusieurs années, seront complétées d'expérimentations en laboratoire sur des systèmes de colonne à bulles. L'objectif est de mettre au point, sur un modèle analogique contrôlé, des méthodes géophysiques d'identification du régime du système à partir de multiples points de mesure localisés en dehors de la source hydrothermale. Des collaborations avec l'IPR et l'IRISA se mettent en place pour coupler ces expérimentations analogiques à des modèles numériques de transferts thermiques notamment. Cette approche portera sur l'analyse des couplages et des instabilités des différents sous-systèmes, approche spécifique à l'analyse des systèmes complexes en général.

BILAN DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Ces perspectives de recherche scientifiques bénéficient d'une sérieuse expérience acquise à travers les différents projets que j'ai pu mener jusqu'à présent. La motivation de ces projets réside à la fois dans une démarche complète de leur déroulement, depuis leur conception jusqu'à leur valorisation, et dans une approche scientifique innovante pouvant présenter certains risques en terme de résultats. Conscient de ce contexte, parfois rendu difficile par la diversité des compétences requises et le risque de dispersion thématique, j'estime qu'il reste malgré tout une source d'exploration ouverte et adaptée au développement d'une recherche multidisciplinaire. Pour avoir choisi cette approche dans ma démarche scientifique, je connais l'investissement nécessaire pour mener à bien ces différents champs d'investigation, diriger et coordonner les activités de recherche associées. Par conséquent, les perspectives introduites ci-dessus orientent mes recherches à venir, recherches qui sauront s'adapter notamment aux imprévus en terme d'opportunité de financements de projets et d'encadrement de doctorants.

Références bibliographiques

- [1] K. Aki. “Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors”. In: *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo* 35 (1957), pp. 415–456.
- [2] Paschalis Apostolidis, Dimitrios Raptakis, Zafeiria Roumelioti, and Kyriazis Pitilakis. “Determination of S-wave velocity structure using microtremors and SPAC method applied in Thessaloniki (Greece)”. In: *Soil dynamics and earthquake engineering* 24.1 (2004), pp. 49–67.
- [3] J.M. Augustin, R. Le Suave, X. Lurton, M. Voisset, S. Dugelay, and C. Satra. “Contribution of the multibeam acoustic imagery to the exploration of the sea-bottom”. In: *Marine Geophys. Res.* 18 (1996), pp. 459–486.
- [4] P. Blümling, F. Bernier, P. Lebon, and C. Derek Martin. “The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment”. In: *Phys. Chem. Earth* 32 (2007), pp. 588–599.
- [5] S. Bonnefoy-Claudet, C. Cornou, P.-Y. Bard, F. Cotton, P. Moczo, J. Kristek, and F. Donat. “H/V ratio : a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations”. In: *Geophysical Journal International* 167.2 (2006), pp. 827–837.
- [6] G Bornstein, Berta Biescas, Valentí Sallarès, and JF Mojica. “Direct temperature and salinity acoustic full waveform inversion”. In: *Geophysical Research Letters* 40.16 (2013), pp. 4344–4348.
- [7] Paul Bossart, Thomas Trick, Peter M Meier, and Juan-Carlos Mayor. “Structural and hydrogeological characterisation of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland)”. In: *Applied clay science* 26.1 (2004), pp. 429–448.
- [8] Florent Brenguier, Nikolai M Shapiro, Michel Campillo, Alexandre Nercessian, and Valérie Ferrazzini. “3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations”. In: *Geophysical research letters* 34.2 (2007).
- [9] R. Burridge, G.S. Papanicolaou, and B.S. White. “One-dimensional wave propagation in a highly discontinuous medium”. In: *Wave Motion* 10.1 (1988), pp. 19–44.

-
- [10] Michel Campillo and Anne Paul. “Long-range correlations in the diffuse seismic coda”. In: *Science* 299.5606 (2003), pp. 547–549.
- [11] D.W. Caress and D.N. Chayes. “New software for processing sidescan data from sidescan-capable multibeam sonars”. In: *OCEANS’95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings*. Vol. 2. IEEE. 1995, pp. 997–1000.
- [12] D.W. Caress and D.N. Chayes. “Improved processing of Hydrosweep DS multibeam data on the R/V Maurice Ewing”. In: *Marine Geophysical Researches* 18.6 (1996), pp. 631–650.
- [13] S. Chopra and K.J. Marfurt. “Seismic attributes—A historical perspective”. In: *Geophysics* 70.5 (2005), 3SO–28SO.
- [14] J.-Y. Collot, S. Migeon, G. Spence, Y. Le Gonidec, B. Marcaillou, J.-L. Schneider, F. Michaud, A. Alvarado, J.F. Lebrun, M. Sosson, and A. Pazmino. “Seafloor margin map helps in understanding subduction earthquakes”. In: *EOS Transaction American Geophysical Union* 86.46 (2005), pp. 463–465.
- [15] S. Courrech Du Pont, P. Gondret, B. Perrin, and M. Rabaud. “Wall effects on granular heap stability”. In: *Phys. Rev. Lett.* 61.4 (2003), pp. 492–498.
- [16] Christian David, Beatriz Menéndez, and Jean-Marie Mengus. “Influence of mechanical damage on fluid flow patterns investigated using CT scanning imaging and acoustic emissions techniques”. In: *Geophysical Research Letters* 35.16 (2008).
- [17] C. De Moustier and H. Matsumoto. “Seafloor acoustic remote sensing with multibeam echo-sounders and bathymetric sidescan sonar systems”. In: *Marine Geophysical Researches* 15 (1993), pp. 27–42.
- [18] S. Kiesgen De Richter, G. Le Caër, and R. Delannay. “Dynamics of rearrangements during inclination of granular packings : the avalanche precursor regime”. In: *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 2012.04 (2012), P04013.
- [19] Benoit Derode, Frédéric Cappa, Yves Guglielmi, and Jonny Rutqvist. “Coupled seismo-hydronechanical monitoring of inelastic effects on injection-induced fracture permeability”. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 61 (2013), pp. 266–274.
- [20] M. Duranteau, V. Tournat, V. Yu Zaitsev, R. Delannay, P. Richard, *et al.* “Identification of avalanche precursors by acoustic probing in the bulk of tilted granular layers”. In: *Aip Conference Proceedings*. Vol. 1542. 2013, pp. 650–653.
- [21] S. D. Falls and R. P. Young. “Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterise the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock”. In: *Tectonophysics* 289.1 (1998), pp. 1–15.
- [22] S. Foti, S. Parolai, P. Bergamo, G. Di Giulio, M. Maraschini, G. Milana, M. Picozzi, and R. Puglia. “Surface wave surveys for seismic site characterization of accelerometric stations in ITACA”. In: *Bulletin of Earthquake Engineering* 9.6 (2011), pp. 1797–1820.

-
- [23] D. Gibert, F. Beauducel, Y. Déclais, N. Lesparre, J. Marteau, F. Nicollin, and A. Tarantola. “Muon tomography : Plans for observations in the Lesser Antilles”. In: *Earth Planets and Space (EPS)* 62.2 (2010), p. 153.
- [24] D. Gibert, M. Holschneider, and J.-L. Le Mouél. “Wavelet analysis of the Chandler wobble”. In: *Journal of Geophysical Research* 103.B11 (1998), pp. 27069–27089.
- [25] V. Gibiat, E. Plaza, and P. De Guilbert. “titre”. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 123 (2009).
- [26] R. Glowinski and Y. Kuznetsov. “On the solution of the Dirichlet problem for linear elliptic operators by a distributed Lagrange multiplier method”. In: *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences-Series I-Mathematics* 327.7 (1998), pp. 693–698.
- [27] R. Glowinski, T-W Pan, T. I. Hesla, and D. D. Joseph. “A distributed Lagrange multiplier/fictitious domain method for particulate flows”. In: *International Journal of Multiphase Flow* 25.5 (1999), pp. 755–794.
- [28] Pierre Gouedard, L Stehly, F Brenguier, Michel Campillo, Y Colin de Verdiere, Eric Larose, L Margerin, P Roux, Francisco J Sánchez-Sesma, NM Shapiro, *et al.* “Cross-correlation of random fields : Mathematical approach and applications”. In: *Geophysical prospecting* 56.3 (2008), pp. 375–393.
- [29] S.H. Gray and N. Bleistein. “Imaging and inversion of zero-offset seismic data”. In: *Proc. IEEE* 74.3 (1986), pp. 440–456.
- [30] F. Hecht. *FreeFem++*. Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et Marie Curie, Paris, third édition. URL <http://www.freefem.org/ff++/ftp/freefem++doc.pdf>, 2012.
- [31] A. Helmstetter and S. Garambois. “Seismic monitoring of Séchilienne rockslide (French Alps) : Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls”. In: *Journal of Geophysical Research : Earth Surface (2003–2012)* 115.F3 (2010).
- [32] C. Hibert, A. Mangeney, G. Grandjean, and N.M. Shapiro. “Slope instabilities in Doolomieu crater, Réunion Island : From seismic signals to rockfall characteristics”. In: *Journal of Geophysical Research : Earth Surface (2003–2012)* 116.F4 (2011).
- [33] R.W. Hobbs, D. Klaeschen, V. Sallarès, E. Vsemirnova, and C. Papenberg. “Effect of seismic source bandwidth on reflection sections to image water structure”. In: *Geophysical Research Letters* 36.24 (2009).
- [34] M. Holschneider. *Wavelets : an analysis tool*. Clarendon, 1995.
- [35] J.A. Hudson, R.G. Pearce, and R.M. Rogers. “Source type plot for inversion of the moment tensor”. In: *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)* 94.B1 (1989), pp. 765–774.
- [36] D. Hurther, P. D. Thorne, M. Bricault, U. Lemmin, and J.-. Barnoud. “A multi-frequency Acoustic Concentration and Velocity Profiler (ACVP) for boundary layer measurements of fine-scale flow and sediment transport processes”. In: *Coastal Engineering* 58.7 (2011), pp. 594–605.

-
- [37] D. Imbert. “Propagation d’ondes acoustiques dans une suspension de grains mobiles immergés : couplage de modèles discret et continu par la méthode des domaines fictifs”. PhD thesis. Université de Rennes 1, 2013.
- [38] D. Imbert and S. McNamara. “Fictitious domain method to model a movable rigid body in a sound wave”. In: *J. Num. Math.* 20 (2012), pp. 267–286.
- [39] D. Imbert, S. Mcnamara, and Y. Le Gonidec. “Fictitious domain method for acoustic waves through a granular suspension of movable rigid spheres”. In: *Journal of Computational Physics* 280 (2015), pp. 676–691.
- [40] Pierre Jeanne, Yves Guglielmi, and Frédéric Cappa. “Multiscale seismic signature of a small fault zone in a carbonate reservoir : Relationships between V P imaging, fault zone architecture and cohesion”. In: *Tectonophysics* 554 (2012), pp. 185–201.
- [41] S. Ker. “Développement de méthodes d’imagerie sismique par grand fond et d’analyse multiéchelle par ondelettes pour la caractérisation à haute résolution du sous-sol marin”. PhD thesis. Institut de Physique du Globe de Paris, 2012.
- [42] S. Ker, Y. Le Gall, T. Marsset, and P. Leon. “Sysif, a Low Frequency Seismic Profiler for Near Bottom Marine Geophysics”. In: *70th EAGE Conference & Exhibition*. 2008.
- [43] S. Ker, Y. Le Gonidec, and D. Gibert. “Multiscale seismic attributes : source-corrected wavelet response and application to high-resolution seismic data”. In: *Geophys. J. Int.* 190 (2012), pp. 1746–1760.
- [44] S. Ker, Y. Le Gonidec, and D. Gibert. “Multiresolution seismic data fusion with a generalized wavelet-based method to derive subseabed acoustic properties”. In: *Geophys. J. Int.* 195 (2013), pp. 1370–1383.
- [45] S. Ker, Y. Le Gonidec, D. Gibert, and B. Marsset. “Multiscale seismic attributes : a wavelet-based method and its application to high-resolution seismic and ground truth data”. In: *Geophys. J. Int.* 187 (2011), pp. 1038–1054.
- [46] S. Ker, Y. Le Gonidec, L. Marié, Y. Thomas, and D. Gibert. “Multiscale Seismic Reflectivity of Shallow Thermoclines”. In: *Journal of Geophysical Research : Oceans* 120.3 (2015), pp. 1872–1886.
- [47] S. Ker, Y. Le Gonidec, B. Marsset, G.K. Westbrook, D. Gibert, and T.A. Minshall. “Fine-scale gas distribution assessed from deep-towed seismic data”. In: *Geophys. J. Int.* 196.3 (2014), pp. 1466–1470.
- [48] S. Ker, B. Marsset, S. Garziglia, Y. Le Gonidec, D. Gibert, M. Voisset, and J. Adamy. “High-resolution seismic imaging in deep sea from a joint deep-towed/OBH reflection experiment : application to a Mass Transport Complex offshore Nigeria”. In: *Geophys. J. Int.* 182 (2010), pp. 1524–1542.
- [49] K. Konno and T. Ohmachi. “Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 88.1 (1998), pp. 228–241.

-
- [50] G.T. Kuster and M.N. Toksöz. “Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media : Part I : Theoretical formulations”. In: *Geophysics* 39.5 (1974), pp. 587–606.
- [51] G. Lamarche, X. Lurton, A.-L. Verdier, and J.-M. Augustin. “Quantitative characterisation of seafloor substrate and bedforms using advanced processing of multibeam backscatter—application to Cook Strait, New Zealand”. In: *Continental Shelf Research* 31.2 (2011), S93–S109.
- [52] Y. Le Gonidec. “Caractérisation d’interfaces et de milieux complexes par analyse sismique multi-échelle : expérimentation et modélisation en régime de diffusion multiple”. PhD thesis. Université de Rennes 1, 2001.
- [53] Y. Le Gonidec, F. Conil, and D. Gibert. “The wavelet response as a NDT method”. In: *Ultrasonics* 41 (2003), pp. 487–497.
- [54] Y. Le Gonidec and D. Gibert. “The Wavelet Response as a Multiscale Characterization of Scattering Processes at Granular Interfaces”. In: *Ultrasonics* 44 (2006), pp. 381–390.
- [55] Y. Le Gonidec and D. Gibert. “Multiscale analysis of waves reflected by granular media : Acoustic experiments on glass beads and effective medium theories”. In: *Journal of Geophysical Research* 112 (2007), pp. 381–390.
- [56] Y. Le Gonidec, D. Gibert, and J.-N. Proust. “Multiscale analysis of waves reflected by complex interfaces : basic principles and experiments”. In: *Journal of Geophysical Research* 107 (2002).
- [57] Y. Le Gonidec, G. Lamarche, and I.C. Wright. “Using sound waves to sort out seafloor sediment types”. In: *Water and Atmosphere* 11 (2003).
- [58] Y. Le Gonidec, G. Lamarche, and I.C. Wright. “Inhomogeneous Substrate Analysis using EM300 Backscatter imagery”. In: *Marine Geophysical Researches* 124 (2005).
- [59] Y. Le Gonidec, C. Nussbaum, J. Sarout, J. Wassermann, and P. Bossart. “Microseismicity Induced in the Opalinus Clay by a Gallery Excavation in the Mont Terri Underground Rock Laboratory”. In: *Proc. American Rock Mechanics Association*. 2015.
- [60] Y. Le Gonidec, J. Sarout, J. Wassermann, and C. Nussbaum. “Damage initiation and propagation assessed from stress-induced microseismic events during a mine-by test in the Opalinus Clay”. In: *Geophys. J. Int.* 198.1 (2014), pp. 126–139.
- [61] Y. Le Gonidec, A. Schubnel, J. Wassermann, D. Gibert, C. Nussbaum, B. Kergosien, J. Sarout, A. Maineult, and Y. Guéguen. “Field-scale acoustic investigation of a damaged anisotropic shale during a gallery excavation”. In: *Int. J. Rocks Mech. Min. Sci.* 51 (2012), pp. 136–148.
- [62] AK Mahajan, AK Mundepi, Neetu Chauhan, AS Jasrotia, Nitesh Rai, and Tapas Kumar Gachhayat. “Active seismic and passive microtremor HVSR for assessing site effects in Jammu city, NW Himalaya, India—A case study”. In: *Journal of Applied Geophysics* 77 (2012), pp. 51–62.
- [63] S. Mallat. *A wavelet tour of signal processing : the sparse way*. Academic press, 2008.
-

-
- [64] S. Mallat and W.L. Hwang. “Singularity detection and processing with wavelets”. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 38.2 (1992), pp. 617–643.
- [65] T. Marsset, B. Marsset, S. Ker, Y. Thomas, and Y. Le Gall. “High and very high resolution deep-towed seismic system : Performance and examples from deep water Geohazard studies”. In: *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers* 57.4 (2010), pp. 628–637.
- [66] J. Marteau, D. Gibert, N. Lesparre, F. Nicollin, P. Noli, and F. Giacoppo. “Muons tomography applied to geosciences and volcanology”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 695 (2012), pp. 23–28.
- [67] JB Martino and NA Chandler. “Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory”. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41.8 (2004), pp. 1413–1426.
- [68] S. Migeon, E. Ducassou, Y. Le Gonidec, P. Rouillard, J. Mascle, and M. Revel-Rolland. “The Late Quaternary western Nile deep-sea fan (Eastern Mediterranean) : A model for lobe construction and sand/mud segregation in a silt/mud-rich turbidite system”. In: *Sedimentary Geology* 229.3 (2010), pp. 124–143.
- [69] B. D. Moate and P. D. Thorne. “Scattering from suspended sediments having different and mixed mineralogical compositions : Comparison of laboratory measurements and theoretical predictions”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 133.3 (2013), pp. 1320–1334.
- [70] F. Moreau, D. Gibert, M. Holschneider, and G. Saracco. “Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform : Basic theory”. In: *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* 104.B3 (1999), pp. 5003–5013.
- [71] Yutaka Nakamura. “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”. In: *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports* 30.1 (1989).
- [72] J. A. Nelder and R. Mead. “A simplex method for function minimization”. In: *The computer journal* 7.4 (1965), pp. 308–313.
- [73] M. Nerone, A. Aguirre, A. Calvo, D. Bideau, and I. Ippolito. “Instabilities in slowly driven granular packing”. In: *Phys. Rev. E* 67 (2003).
- [74] C. Nussbaum, P. Bossart, F. Amann, and C. Aubourg. “Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland)”. In: *Swiss Journal of Geosciences* 104.2 (2011), pp. 187–210.
- [75] J.H. Page, H.P. Schriemer, A.E. Bailey, and D.A. Weitz. “Experimental test of the diffusion approximation for multiply scattered sound”. In: *Phys. Rev. E* 52.3 (1995), pp. 3106–3114.
- [76] W.S. Pettitt. “Acoustic emission source studies of microcracking in rock”. PhD thesis. Keele University, 1998.

-
- [77] W.S. Pettitt, C. Baker, D.S. Collins, and R.P. Young. *InSite Seismic Processor User Operations Manual Version 2.10*, Applied Seismology Consultants Ltd. 2003.
- [78] H. Piété, L. Marié, B. Marsset, Y. Thomas, and M.-A. Gutscher. “Seismic reflection imaging of shallow oceanographic structures”. In: *Journal of Geophysical Research* 118.5 (2013), pp. 2329–2344.
- [79] V. Sallarès, B. Biescas, G. Buffett, R. Carbonell, J.J. Dañobeitia, and J.L. Pelegrí. “Relative contribution of temperature and salinity to ocean acoustic reflectivity”. In: *Geophysical Research Letters* 36.24 (2009).
- [80] J.-L. Thiot, Y. Le Gonidec, and B. Kergosien. “Acoustic emissions in granular structures under gravitational destabilization”. In: *AIP Conf. Proc.* 1433 (2012), pp. 143–146.
- [81] L. Thomsen. “Weak elastic anisotropy”. In: *Geophysics* 51.10 (1986), pp. 1954–1966.
- [82] V. Tournat, V. Yu Zaitsev, V.E. Nazarov, V.E. Gusev, and B. Castagnède. “Experimental study of nonlinear acoustic effects in a granular medium”. In: *Acoustical Physics* 51.5 (2005), pp. 543–553.
- [83] R. J. Urick. *Principles of underwater sound for engineers*. Tata McGraw-Hill Education, 1967.
- [84] J. Voit. *The statistical mechanics of financial markets*. Vol. 2. Springer Berlin, 2003.
- [85] P.C. Waterman and R. Truell. “Multiple scattering of waves”. In: *Journal of Mathematical Physics* 2.4 (1961), pp. 512–537.
- [86] M.B. Widess. “How thin is a thin bed?” In: *Geophysics* 38.6 (1973), pp. 1176–1180.
- [87] R.P. Young, J.F. Hazzard, and W.S. Pettitt. “Seismic and micromechanical studies of rock fracture”. In: *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000), pp. 1767–1770.
- [88] V. Yu Zaitsev, P. Richard, R. Delannay, V. Tournat, and V.E. Gusev. “Pre-avalanche structural rearrangements in the bulk of granular medium : Experimental evidence”. In: *Europhysics Letters* 83.6 (2008), p. 64003.

Annexe : sélection d'articles

1. Y. Le Gonidec and D. Gibert. “Multiscale analysis of waves reflected by granular media : Acoustic experiments on glass beads and effective medium theories”. In: *Journal of Geophysical Research* 112 (2007), pp. 381–390
2. D. Imbert, S. Mcnamara, and Y. Le Gonidec. “Fictitious domain method for acoustic waves through a granular suspension of movable rigid spheres”. In: *Journal of Computational Physics* 280 (2015), pp. 676–691
3. S. Ker, Y. Le Gonidec, and D. Gibert. “Multiresolution seismic data fusion with a generalized wavelet-based method to derive subseabed acoustic properties”. In: *Geophys. J. Int.* 195 (2013), pp. 1370–1383
4. Y. Le Gonidec, J. Sarout, J. Wassermann, and C. Nussbaum. “Damage initiation and propagation assessed from stress-induced microseismic events during a mine-by test in the Opalinus Clay”. In: *Geophys. J. Int.* 198.1 (2014), pp. 126–139