
Développements électroacoustiques en sismique marine Très Haute Résolution

Y. Le Gall and B. Marsset

IFREMER-Brest, TSI/AS, BP 70, 29280 Plouzané, France

*: Corresponding authors : Y. Le Gall, email address : Yves.Le.Gall@ifremer.fr ; B. Marsset, email address : Bruno.Marsset@ifremer.fr ; tel. 02 98 22 40 40

Abstract:

High to Very High Resolution marine seismics are of common use to build and refine models of sediment processes and to explore, for instance, relationships between sediment stratigraphy and sea level variations. The frequency range of this technology lays between 200 and 4000 Hz, providing a vertical resolution of metric to sub-metric scale.

Marine experiments with seismic source and receivers towed close to the seafloor are set up in order to limit the energy loss related to wave front divergence and unwanted 3D effects or diffraction hyperbolas deteriorating the quality of the resulting seismic image. The technological challenge was thus to provide users with appropriate seismic acquisition system able to deal with high hydrostatic pressure which forbids the use of any conventional surface-towed explosive source.

The Janus-Helmholtz acoustic source, initially designed for low frequency active sonar, allows a wide frequency bandwidth and offers a highly repeatable acoustic signal perfectly tailored for accurate soil characterisation. The potential of this acoustic sources may be achieved only if the receiving array is able to take full advantage of the quality of the emitted signal and therefore hydrophones and streamer were designed to meet those requirements.

Résumé :

La sismique réflexion marine Haute ou Très Haute Résolution (HR ou THR), mise en oeuvre pour les reconnaissances géotechniques des sols superficiels, utilise des fréquences comprises entre quelques centaines de Hz et quelques kHz. Ceci lui confère un pouvoir de résolution métrique ou décimétrique, associé à une pénétration de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, fonction de la nature des sols reconnus.

Les systèmes conventionnels sont constitués d'émetteurs et d'antennes linéaires de réception remorqués en surface. Afin d'augmenter les résolutions latérale et verticale, et de limiter les pertes en transmission par divergence sphérique, l'IFREMER a développé plusieurs outils de sismique marine remorqués près du fond permettant ainsi de répondre aux nouveaux besoins de reconnaissance en mer profonde (risques naturels, exploration industrielle, ...).

L'utilisation d'une source ou d'un récepteur sismique par grande profondeur est confrontée au problème de la pression hydrostatique ambiante. Les transducteurs d'émission basse fréquence et large bande, issus de la technologie Janus-Helmholtz, et les antennes de réception ont été ainsi adaptés aux très grandes immersions (6000 m).

Le contexte scientifique

Les outils modernes de reconnaissance et de cartographie permettent l'acquisition de données sismiques depuis l'échelle régionale, où les opérations de reconnaissances sismiques à forte pénétration permettent d'imager les séries profondes, jusqu'à l'échelle des corps sédimentaires, des glissements sous-marins ou encore des zones à hydrate de gaz. Dans ces derniers domaines, les systèmes sismiques conventionnels tractés en surface présentent des limitations en terme de résolution, limitations qui rendent impossibles la mise en évidence par grande profondeur d'eau de figures sédimentaires détaillées.

Des illustrations du besoin de cette résolution peuvent être trouvées tant dans le domaine industriel (recherche appliquée) que dans le domaine académique (recherche fondamentale) [1] :

- Le transport sédimentaire au delà du plateau continental se fait au travers du phénomène des avalanches sous-marines à l'origine de la création d'éventails sédimentaires sous-marins. Les turbidites ainsi déposées constituent un type particulier de corps sédimentaire, dont l'étude dans les systèmes actuels permettra de développer des modèles de réservoirs analogues aux dépôts fossiles devenus gisements d'hydrocarbure.

- La déstabilisation thermique des hydrates de gaz présents dans les sédiments marins pourrait jouer un rôle fondamental dans les changements climatiques par libération de méthane, d'autre part cette déstabilisation pourrait être à l'origine de grands glissements de terrain, tels les glissements de Storegga au large de la Norvège.

L'acquisition de données sismiques THR répondant aux besoins scientifiques des géosciences marines s'est traduite par des développements technologiques importants à l'IFREMER sur la période 1996-2005. Ces réalisations innovantes en électroacoustique sous-marine, relatives aux transducteurs d'émission, à l'électronique de puissance associée, et aux antennes de réception, ont mené à la réalisation de deux démonstrateurs THR et HR dont les caractéristiques principales et les résultats scientifiques sont présentés dans ce document.

Le transducteur d'émission Janus-Helmholtz

Description et performances

Conçu par le département Lutte Sous-Marine de DCN Ingénierie Sud pour ses applications en sonar actif, le transducteur Janus-Helmholtz est composé d'un moteur piézoélectrique de type Janus, c'est à dire d'un pilier de céramiques inséré entre deux pavillons identiques (Fig. 1). Cette structure est montée à l'intérieur d'un boîtier ou baffle cylindrique ouvert en son milieu, créant ainsi l'évent de ce transducteur de type bass-reflex, le découplage pavillons-boîtier étant assuré par une fente de quelques millimètres. En basses fréquences, le mouvement de compression-dilatation de la colonne active autorise un bon couplage avec les pavillons rayonnants. Une tige de précontrainte centrale assure la rigidité de l'ensemble, et permet aux céramiques de travailler dans leur mode favorable de compression [2].

Pour des applications en moyenne profondeur, des tubes élastiques en Composite Verre-Résine remplis d'air sont insérés dans la cavité du transducteur, de façon à couvrir une bande plus basse en fréquence. L'écrasement de ces tubes soumis à la pression hydrostatique limite malheureusement l'immersion à quelques centaines de mètres. Pour les applications en sismique marine par grande immersion, la suppression de ces tubes et la mise en précontrainte par des haubans extérieurs au pilier de céramiques permet de bénéficier d'un transducteur à immersion libre, c'est à dire capable d'opérer quelle que soit la pression hydrostatique. La directivité axiale qui en résulte s'explique par l'amortissement du phénomène de résonance de Helmholtz dépendant de l'élasticité de la cavité.

Ce transducteur présente un excellent rapport entre la puissance acoustique générée et son encombrement. Il est large bande passante en raison du couplage entre deux structures résonnantes, le moteur Janus, et la cavité délimitée par le boîtier et les pavillons [3]. Comparé aux sources sismiques conventionnelles de type sparker ou boomer, il présente les avantages de la grande immersion, de la répétitivité de l'émission, et donc de la bonne connaissance du signal émis. La différence de niveau entre les sources sparker et piézoélectriques est compensée par l'utilisation de modulations de fréquences longue-durée associées à un traitement cohérent.

Modélisation

ATILA (Analyse de Transducteurs par Intégration des équations de Laplace) est un code de calcul par éléments-finis spécialement développé pour permettre la modélisation de transducteurs rayonnant dans un fluide. Il peut être utilisé pour une analyse statique, modale ou harmonique de structures élastiques, piézoélectriques ou magnétostrictives [4]. Le Janus-Helmholtz étant un transducteur à symétrie de révolution qui, de plus, présente un plan de symétrie, il est possible d'effectuer un calcul bidimensionnel. Le néoprène de vulcanisation et les pertes globales insérées sous forme de matrices complexes sont pris en compte dans le modèle. Toutes les grandeurs électroacoustiques essentielles sont accessibles : la sensibilité à l'émission (S_v) (rapport entre la pression acoustique à 1 m et la tension électrique appliquée aux bornes du transducteur), les diagrammes de directivité, l'impédance électrique du capteur assimilé à une résistance et une capacité parallèles. Les iso-valeurs de pressions acoustiques, de déplacements, de potentiels électriques et de contraintes sont également disponibles. La figure 2 représente un exemple de vue 3D d'une simulation de ce type de transducteur.



Fig. 1 : Le moteur de type Janus

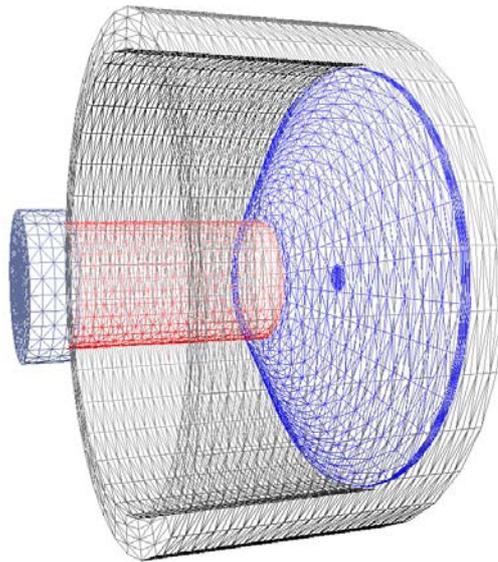


Fig. 2 : exemple de modélisation du transducteur Janus-Helmholtz

Adaptation à la sismique marine haute et très haute résolution

Le Janus-Helmholtz retenu pour l'application sismique THR (JH650-6000 ; Fig. 3) permet dans un encombrement relativement modeste (*longueur* : 612 mm ; *diamètre* : 456 mm) de couvrir la bande fréquentielle [650, 2000 Hz], avec une sensibilité axiale supérieure à 132 dB (réf. 1 $\mu\text{Pa/V}$ à 1 m) (Fig. 4). Dimensions et poids du transducteur (90 kg dans l'air ; 55 kg dans l'eau) facilitent son intégration dans un poisson remorqué.

Pour l'application sismique HR, en vue d'augmenter la pénétration tout en conservant une résolution verticale métrique, l'utilisation du code ATILA a permis de dimensionner un transducteur Très Basse Fréquence (TBF) à immersion libre présentant deux octaves de bande passante et une sensibilité axiale élevée (JH250-6000 ; Fig. 5 et 6). En raison de sa gamme de travail [250, 1000 Hz], dimensions et poids de ce capteur électroacoustique (*longueur* : 1120 mm ; *diamètre* : 716 mm ; 450 kg dans l'air) sont largement supérieurs en sismique HR.

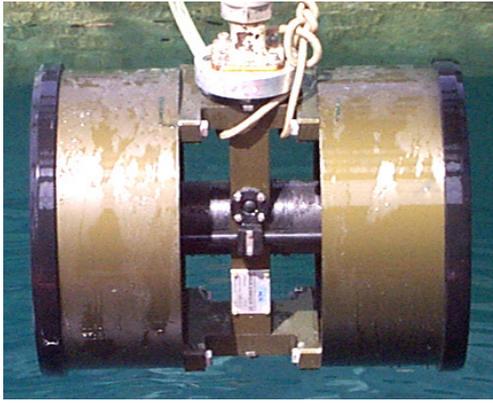


Fig. 3 : Le transducteur JH650-6000

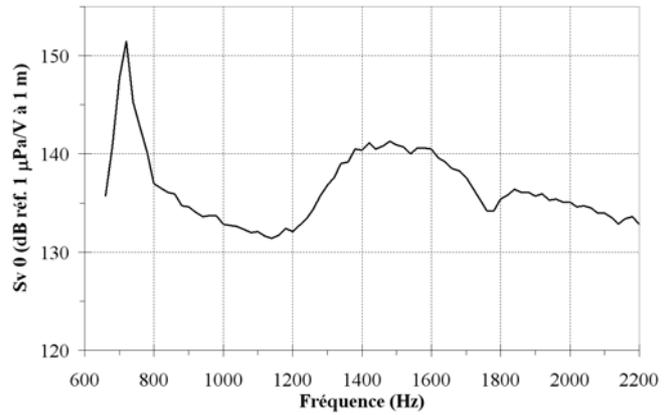


Fig. 4 : Sensibilité à l'émission axiale du transducteur JH650-6000



Fig. 5 : Le transducteur JH250-6000

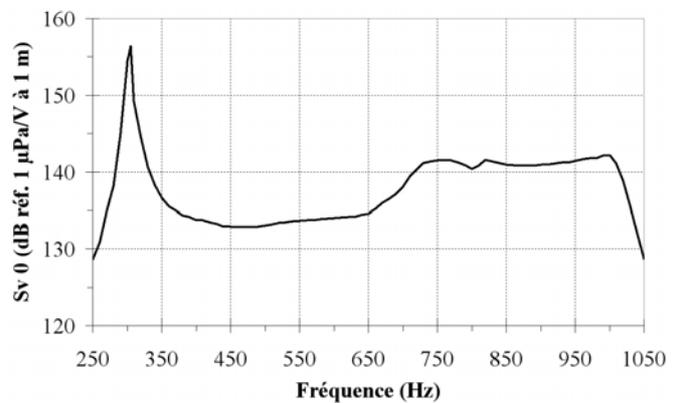


Fig. 6 : Sensibilité à l'émission axiale du transducteur JH250-6000

L'électronique de puissance

Caractéristiques

L'utilisation d'une source tractée en moyenne profondeur (quelques centaines de mètres) peut être envisagée avec un amplificateur de puissance à bord du navire porteur. Les problèmes de rendement ne sont pas fondamentaux et le choix peut être porté sur un amplificateur linéaire, dont le rendement est de l'ordre de 50 %. Pour une application grands fonds, cette configuration ne peut plus être retenue et l'amplificateur de puissance doit nécessairement être intégré au voisinage du transducteur. Les puissances requises pour atteindre des niveaux d'émission supérieurs à 195 dB (réf. 1 μ Pa à 1 m) compliquent le problème de l'évacuation thermique et le rendement de l'amplificateur doit être maximal. Les solutions à découpage, dites de classe D, présentent alors des avantages certains par rapport aux amplifications linéaires, en raison de leur rendement supérieur à 80 %.

Un amplificateur à découpage a été spécifiquement développé pour le pilotage des deux transducteurs JH650-6000 et JH250-6000 (Fig. 7). Ses caractéristiques principales sont, d'une part son aptitude à piloter des charges réactives et variables avec la fréquence, et, d'autre part, une forte puissance afin de bénéficier d'un niveau d'émission cohérent avec les objectifs de pénétration du système. Dans un but de compatibilité avec les deux transducteurs, la bande passante de

l'amplificateur couvre la gamme [200, 2500 Hz], et la tension maximale de sortie est d'environ 1500 V_{rms}.

Dans le but de limiter la puissance réactive, une inductance est montée en parallèle sur la sortie. Elle permet d'équilibrer la puissance apparente dans la bande fréquentielle de fonctionnement de la chaîne d'émission et sa valeur est fixée pour un accord optimal avec le transducteur TBF JH250-6000, plus exigeant en termes de puissance électrique. La puissance maximale de l'amplificateur est de 5 kVA, ses composants étant dimensionnés pour une puissance maximale de 6.5 kVA.

Signaux d'émission

Les signaux d'émission sont des Modulations Linéaires de Fréquences (MLF) dont la durée oscille classiquement entre 50 et 200 ms. Pour éviter d'intégrer une résistance d'étouffement interne qui pourrait compliquer l'évacuation thermique, et pour obtenir un niveau d'émission constant, les variations de sensibilité des transducteurs sont compensées par modulation d'amplitude adaptée. A cette modulation d'amplitude se rajoute une double pondération en début et en fin de signal pour, respectivement, limiter le courant initial, et réduire la puissance apparente en fin de bande. L'amplificateur se programme en début ou en cours de déploiement, par l'intermédiaire d'une liaison série. Les quatre gabarits différents téléchargés tiennent compte du choix du transducteur, du contenu fréquentiel du signal, du choix des modulations d'amplitude, de la durée, du niveau et de la récurrence du signal. Pour chaque motif, la tension de sortie théorique de sortie est affichée (Fig. 8). A pleine puissance, le niveau d'émission pour les deux applications THR et HR est constant et égal à 196 dB (réf. 1 µPa à 1 m) dans les bandes [650, 2000 Hz] et [250, 1000 Hz].



Fig. 7 : Electronique de puissance 5 kVA

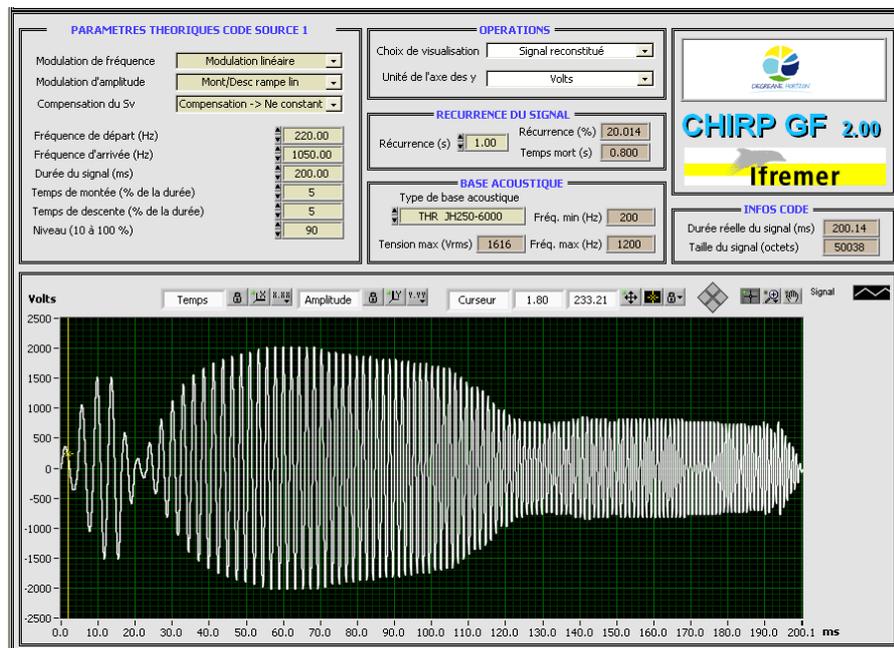


Fig. 8 : Pilotage numérique de l'amplificateur de puissance et exemple de tension électrique de sortie théorique

L'antenne de réception analogique monovoie

Description et performances

La réception des signaux sismiques s'effectue sur une antenne linéaire remorquée, appelée communément flûte ou streamer. Les capteurs électroacoustiques internes sont des hydrophones qui convertissent par effet piézoélectrique direct la pression acoustique en tension électrique, leur fonction de transfert étant dénommée Sensibilité hydrophonique (S_h). Le signal de tension est ensuite filtré (passe bande) et amplifié par l'intermédiaire d'un préamplificateur à gain fixe ou variable.

Les hydrophones classiquement utilisés en sismique conventionnelle de surface ne sont pas adaptés aux grandes profondeurs, et leurs performances évoluent avec l'immersion. Dans le cadre du projet de sismique HR et THR par grande profondeur, une antenne linéaire analogique monovoie d'une dizaine de mètres de longueur a été spécifiquement développée (Fig. 9). Les hydrophones retenus sont des TUBA6000, dont la sensibilité hydrophonique est élevée ($S_h = -193$ dB (réf. 1 V/ μ Pa)) et quasi-indépendante de l'immersion (perte de 1 dB entre 0 et 6000 m) ; ils sont opérationnels dans la bande de fréquence [0, 15 kHz]. Afin de bénéficier d'une directivité permettant de filtrer les bruits éventuels en provenance du porteur, la voie est constituée de six hydrophones montés électriquement en parallèle, l'espace inter-capteurs étant de 30 cm. Le préamplificateur utilisé, de gain fixe 35 dB, est, quant à lui, en parfaite équipression. Le faible bruit électrique induit par ce circuit permet de bénéficier de capacités d'écoute très élevées jusqu'à 3 kHz (Mer 0, soit le plus faible niveau de bruit ambiant dans l'océan).



Fig. 9 : Flûte sismique 6000 m

Mise en œuvre et résultats

L'acquisition de données sismiques par grande immersion requière un matériel de mise en œuvre lourd tant au niveau du support naval que du matériel propre à la mesure. L'utilisation de câbles électro-opto-porteur de grande longueur nécessite le développement de protocole de transmission de données numériques (dialogue fond-surface, synchronisation émission-réception, ...), mais aussi l'adaptation de l'alimentation électrique Haute Tension de l'amplificateur de puissance aux caractéristiques du câble. Le positionnement du vecteur immergé est réalisé, quand à lui, par liaison acoustique avec le navire (base ultra-courte). Les résultats présentés ont été principalement obtenus dans le cadre de campagnes technologiques d'essais à la mer des différents transducteurs développés (Fig. 10).



Fig. 10 : Mise en œuvre de la sismique THR
Golfe de Guinée (2004)

Marge marocaine (2002) : l'objectif de cette campagne adressait l'étude de la présence de fluides associée à des phénomènes de fracturation dans un contexte sédimentaire caractérisé par la présence de nombreux volcans de boue. Les données acquises avec la chaîne d'émission JH650-6000 associée à une flûte de réception analogique ont permis la mise en évidence de nombreuses figures d'échappement de fluide associées ou non à des failles de croissance syn-sédimentaires (Fig. 11).

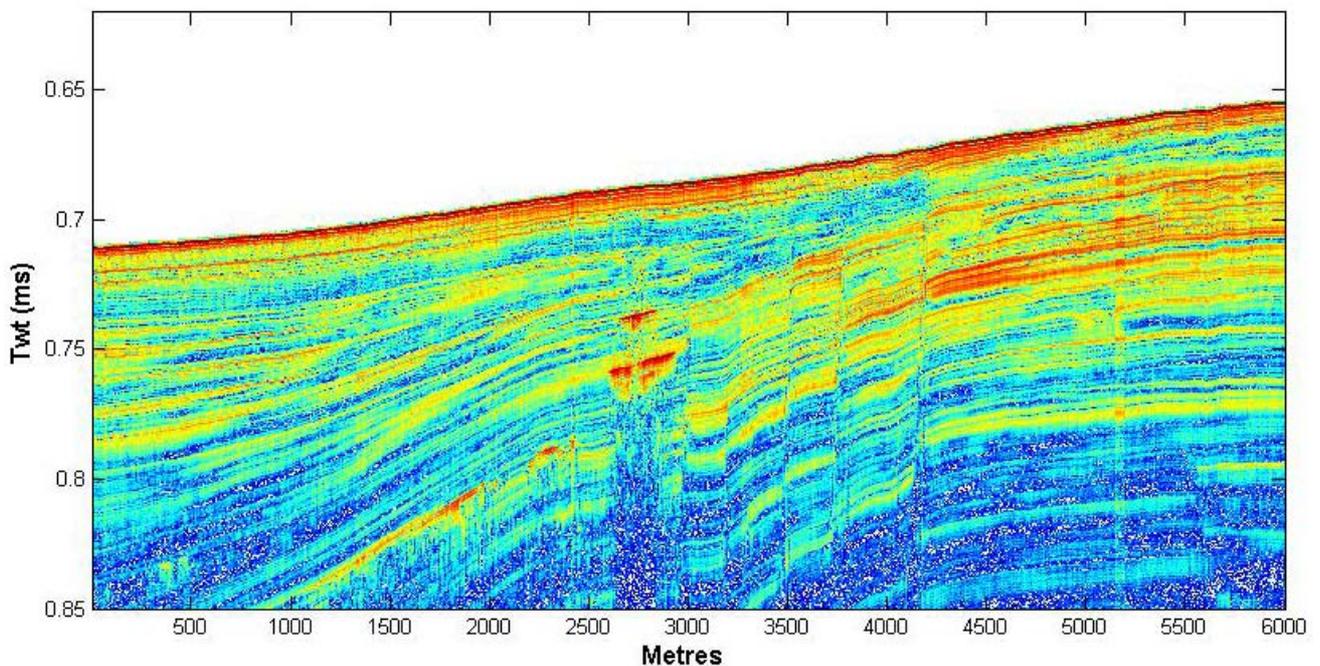


Fig. 11 : Acquisition marge marocaine (2002), JH650-6000 : mise en évidence de la présence de fracturation associée à des fluides par le calcul des attributs d'amplitude

Golfe de Guinée (2004) : la campagne NERIS2 au large de l'Angola visait à une caractérisation des risques géologiques / géotechniques de sub-surface en mer profonde. Les mesures géotechniques réalisées durant cette reconnaissance consistaient en des mesures locales dont la corrélation a pu être menée par le biais de l'acquisition de profils sismiques remorqués fond de mer utilisant le transducteur d'émission JH650-6000 associée à une flûte de réception numérique monovoie (Fig. 12).

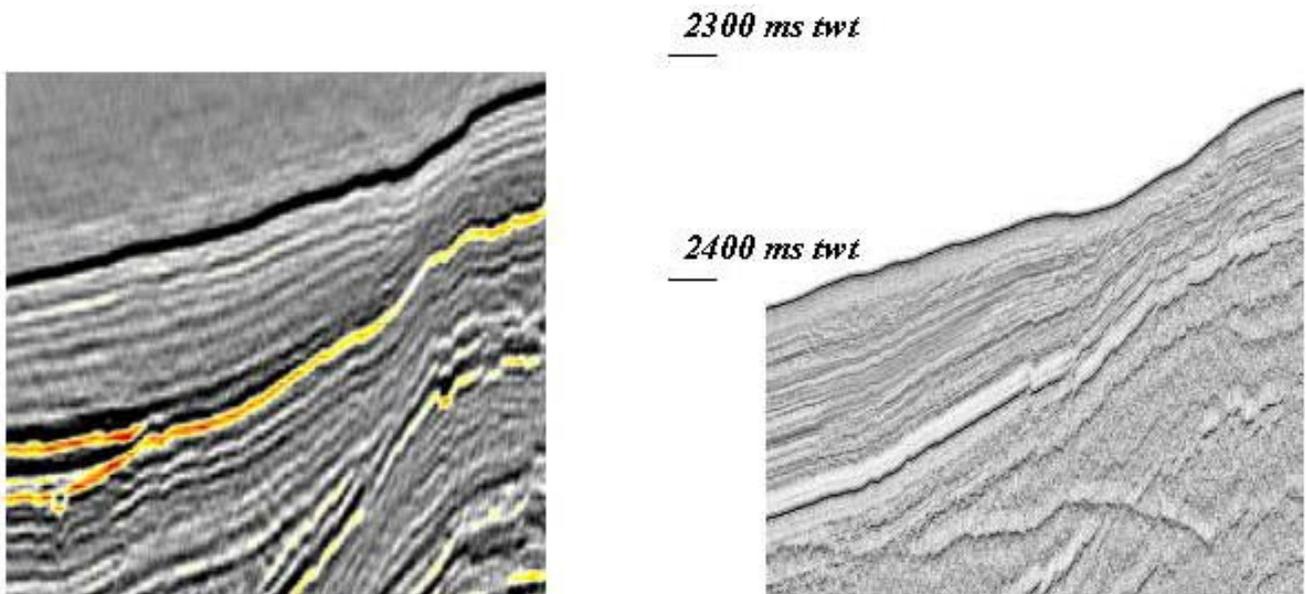


Fig. 12 : Acquisition golfe de Guinée (2004) : Comparaison qualitative d'une section sismique conventionnelle surface (gauche) et d'une section sismique remorquée fond de mer THR (droite)

Marge armoricaine (2005) : la première mise en oeuvre du transducteur d'émission JH250-6000 a été menée lors d'une campagne d'opportunité sur le plateau de Meriazdek en Atlantique Nord. L'objectif des essais consistait dans l'évaluation de la profondeur de pénétration du nouveau transducteur en fonction de sa fréquence de travail (250-1000 Hz). La profondeur atteinte durant les essais est de l'ordre de 400 mètres dans ce contexte géologique, valeur est en tous points conforme aux spécifications du projet (Fig. 13).

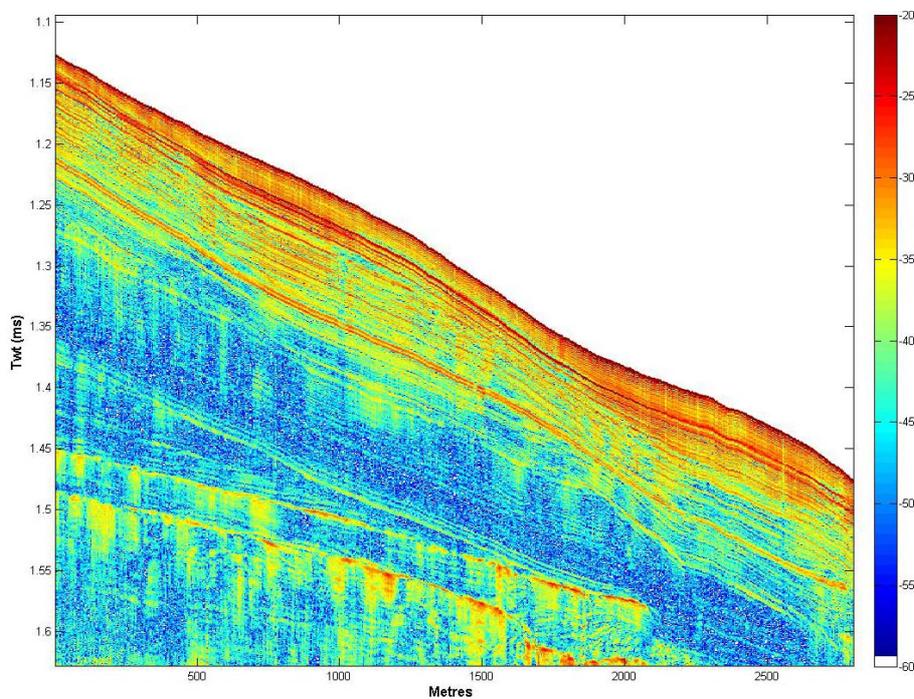


Fig. 13 : Acquisition marge armoricaine (2005), JH250-6000
Pénétration de l'ordre 400 m dans cet environnement sédimentaire

Transfert opérationnel et évolution du système

Projet EXOCET

Les résultats obtenus avec les différents démonstrateurs développés conduisent l'IFREMER à entamer la réalisation en maîtrise d'œuvre d'un nouveau système remorqué à configuration variable, à destination de la communauté scientifique. Ce développement, basé sur la configuration d'un engin existant, le SAR (lest lourd et poisson neutre et stable) couplé au câble optique du ROV *Victor 6000*, et intégrant les capteurs innovants essentiels : sismique près du fond, sonar latéral et bathymétrique haute-résolution grande-couverture, s'appuie sur les compétences, l'expérience et les moyens acquis dans l'Institut sur cette filière d'engins et de capteurs.

L'architecture générale du système est donc basée sur le câble électro-opto-porteur du ROV *Victor* terminé par un lest instrumenté pesant (Fig. 14), auquel est relié à l'extrémité d'une laisse, un véhicule neutre et stable (Fig. 15). Le lest est d'ailleurs instrumenté, car il est dimensionné pour intégrer la source sismique choisie, son amplificateur associé, l'alimentation et la télétransmission générales du système et les différents capteurs de navigation associés (balise de positionnement, altimètre, capteur d'immersion).

Le véhicule qui est basé sur le poisson SAR transformé en plate-forme d'accueil, est dimensionné pour intégrer un sonar latéral-bathymétrique, un sondeur de sédiment et une flûte sismique (mono ou multitraces) et d'autres capteurs éventuels (magnétomètre, CTD, ADCP, EK60).

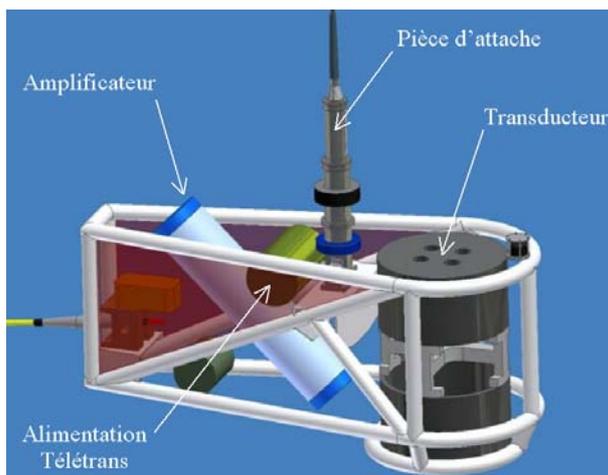


Fig. 14 : Lest instrumenté pesant
Projet EXOCET



Fig. 15 : Véhicule neutre type SAR
Projet EXOCET

Réception multivoie

Une caractérisation quantitative partielle du milieu est réalisée par le calcul des attributs sismiques d'amplitude et d'atténuation. La connaissance des fonctions de transfert émetteur et récepteur permet en effet, d'une part, une évaluation des coefficients de réflexion par bilan d'énergie et, d'autre part, une approche de l'atténuation intrinsèque du matériau par la méthode de rapport des spectres ou de décalage de la fréquence centrale. Les caractéristiques géo-acoustiques ainsi déterminées peuvent alors être corrélées à des données géotechniques issues de puits ou de sondage permettant ainsi l'extrapolation de ces données.

L'absence d'information sur les vitesses de propagation dans le milieu limite néanmoins les possibilités de caractérisation et de corrélation, les paramètres géo-acoustiques étant référencés en temps de trajet. L'application des méthodes conventionnelles de détermination de vitesses de propagation (Normal Move Out, migration itérative, ...) passe par le développement et la mise en oeuvre d'une antenne de réception multivoies permettant l'observation du milieu sous différents angles d'incidence. Cette approche fait actuellement l'objet d'une étude amont afin de proposer une solution technologique au problème du positionnement absolu des couples source-récepteur.

Industriels / Equipe projet

Les industriels impliqués dans les divers développements technologiques en sismique marine par grande profondeur sont : IXSEA (réalisation des transducteurs d'émission et des antennes de réception), DEGREANE (étude et réalisation de l'électronique de puissance), PONS (fourniture des hydrophones TUBA6000), et METRASOL (fourniture des préamplificateurs).

L'équipe IFREMER de développement est constituée de : Marc DERRIEN, Stéphane DIDAILLER, Yves LE GALL, Pierre LEON, Bruno MARSSET, Eric MENUT, et Jean-Pierre REGNAULT.

Références bibliographiques

- [1] Marsset T., Marsset B., Vagner P., Sultan N., Voisset M., Cauquil E., submitted (2006). Geohazard investigation on the Niger continental slope : New insights from near bottom geophysics. Submitted to Marine Geology.
- [2] Le Gall Y. (1994). Transducteur basse fréquence, grande immersion, large bande et à rendement élevé, pour l'océanographie acoustique. Revue l'Onde Electrique – Vol. 74, n°5.
- [3] Le Gall Y., Boucher D., Lurton X. (1993). Depth-unlimited versions of the Janus-Helmholtz : a new interpretation of working principles – Some experimental results. Proceedings of U.D.T., Cannes.
- [4] Hamonic B., Debus J.C., Decarpigny J.N (1990). The finite element code ATILA. Proceedings of the workshop on Power Transducers for Sonics and Ultrasonics.