

Demande de bourse de cofinancement de thèse

1. Titre

Application du sondage électromagnétique pour la mesure de densité *in situ*

2. Unité de recherche et éventuellement l'équipe d'accueil

IFREMER : Département « Ressources minérales et énergétiques, processus sédimentaire et impact sur les écosystèmes »

Unité de recherche : Géosciences Marines

Laboratoire : Aléas géologiques et dynamique sédimentaire

3. Encadrement, contact :

Dr. Christian GAC, IFREMER, ingénieur de recherche

Eric MENUT, IFREMER, REM/RDT/SI2M, ingénieur

Pr. Gérard TANNE, UBO, professeur

4. Coordonnées :

- Christian GAC, IFREMER, REM/GM/LAD, Centre Bretagne - ZI de la Pointe du Diable - CS 10070 - 29280 Plouzané : Pagano-christianisme
- Eric MENUT, IFREMER, REM/RDT/SI2M, Centre Bretagne - ZI de la Pointe du Diable - CS 10070 - 29280 Plouzané : Eric.Menut@ifremer.fr

5. Contexte, objectifs et intérêts scientifiques

Notre travail se situe dans le contexte de la surveillance des fonds marins, que ce soit pour connaître leur nature ou pour évaluer leur stabilité. Ces deux aspects requièrent de caractériser de manière fiable la densité volumique des sédiments. Pour obtenir ce type d'information, il est nécessaire de disposer d'outils de mesure *in situ* adaptés à l'environnement d'une part et ne nécessitant pas de longue phase de traitement d'autre part. Malheureusement, malgré les avancées dans le domaine de l'instrumentation et des capteurs associés, force est de constater qu'il n'existe toujours pas les outils nécessaires à l'atteinte de tels objectifs. Notre souhait est d'apporter un complément d'instrumentation en développant un nouveau type de capteur répondant à ces attentes. **Ce dispositif de mesure de densité correspond à un besoin récurrent depuis déjà plus de 12 ans, autant d'un point de vue scientifique que par les utilisateurs de GENAVIR. La façon de procéder et d'atteindre l'objectif est décrite ci-après.**

Depuis de nombreuses années, divers capteurs ont été développés pour les applications sous-marines. De part les contraintes liées au milieu de l'eau de mer profonde ou non (pression par exemple), la fabrication et le conditionnement de ces capteurs entraînent des conditions que l'on retrouve rarement dans d'autres domaines. D'autre part, depuis quelques années, de

nouveaux instruments ont vu le jour, permettant d'effectuer des mesures complémentaires pour le sondage du sédiment. Il s'agit d'équipements capables de réaliser de la mesure *in situ*, - c'est à dire par un planté de capteur (pénétromètre) [Ref. 1] - de certains paramètres du sédiment sondé, principalement la température et la rigidité. Ce vecteur, lors de sa conception, a été doté de capteurs issus de la technologie d'autres équipements, mais pas de capteurs réellement spécifiques à la mesure fondamentale du sédiment : la densité. C'est dans ce cadre qu'est proposé ce sujet de thèse, c'est à dire la conception et la réalisation d'un nouveau système de mesure robuste appliqué au sondage du sédiment *in situ*.

Le tableau ci-dessous permet la comparaison des différents moyens de mesure exploités aujourd'hui en géotechnique. Le nouveau principe proposé se situe sur la dernière ligne.

Capteur	Fonction, mesure	Principe physique	In situ	Temps réel
Sismique, OBS	Nature du fond sédimentaire	Vitesse acoustique	NON	NON
EM basse fréquence	Conductivité spatiale	Mesure de densité de courant basse fréquence	NON	NON
GEO-PS	Ondes de propagation P Ondes de propagation S	Mesure acoustique	OUI	OUI
IBSENS	Glissement de terrain, crue	Mesure de déplacement	OUI	NON
Pointe PENFELD	Résistance, rigidité, Compressibilité, pression différentielle	Mesure d'effort de frottement et de pression interstitielle	OUI	OUI
Piézomètre	Pression différentielle	Température, pression	OUI	OUI
Gamma	Densité volumique	Rayonnement césium	OUI	NON
Tiltmètre	Glissement de terrain	Inclinomètres	OUI	OUI
EM hyperfréquence	Densité volumique Conductivité	Module et phase d'une transmission micro-onde	OUI	OUI

Ce tableau permet également de s'apercevoir que l'instrumentation, depuis quelques années, tend à devenir « *in situ* » et temps réel, ce qui correspond aujourd'hui à une véritable demande des scientifiques.

Enjeux scientifiques marine et géotechnique

L'étude des systèmes sédimentaires marins et l'évaluation des aléas géologiques associés nécessitent une caractérisation des propriétés physiques et mécaniques du milieu. L'un des paramètres fondamentaux est la densité des sédiments qui apporte notamment une information permettant de mieux étudier le mouvement des pentes sous-marines et indirectement d'anticiper des phénomènes liés à ces mouvements (tremblement de terre, tsunami, éruption volcanique...). Cette caractérisation des matériaux peut se faire en laboratoire sur des échantillons sédimentaires mais la récupération de ces échantillons s'accompagne souvent de perturbations non négligeables générées par le carottage (exemple présence du gaz dissous ou libre dans le sédiment), ce qui nous amène aujourd'hui à favoriser

les mesures *in situ* dans le milieu naturel intact.

La mesure du sédiment *in situ* va très probablement prendre de plus en plus d'importance dans les prochaines années du fait du potentiel de mesures différentes qu'elle permettra, par exemple la conductivité et la densité. L'un des moyens pour y parvenir est de disposer d'un « sondeur » capable de descendre en eau profonde. Ce peut être par exemple le pénétrromètre « PENFELD » dont dispose l'IFREMER.

Il existe aujourd'hui une instrumentation spécifique au pénétrromètre, mais qui ne permet pas la connaissance simultanée de l'ensemble des paramètres indispensables aux diverses applications (densité du sédiment, composition géochimique des eaux interstitielles, etc). Nous proposons dans le cadre de cette thèse de développer un outil pour déterminer la densité du milieu *in situ* par mesure électromagnétique. Au-delà de la mesure de la densité, la méthode électromagnétique peut être aussi utile pour détecter et quantifier les hydrates de gaz *in situ*. Cette méthode a été utilisée récemment par Weitemeyer et al. en 2011 [Ref. 2] pour détecter les hydrates de gaz au large de la Californie.

L'objectif est donc bien de fournir un outil inédit et important pour la communauté et permettant la détermination de la densité volumique, comme décrit ci-après.

Le nouveau principe à exploiter, sur la base d'une onde électromagnétique et de l'interaction onde-matière, sera suffisamment réduit pour s'implanter facilement dans la pointe du pénétrromètre. Son coût de développement ne sera pas très élevé par rapport à l'ensemble de l'instrument de mesure. Par ailleurs, des efforts seront mis en œuvre pour optimiser l'intégration du capteur.

Le système de mesure actuel équipant le PENFELD est la pointe de densité Gamma utilisant une source radioactive. Ce capteur présente plusieurs inconvénients :

- Mesure aléatoire (loi de Poisson), donc statistique à calculer,
- Pas d'acquisition temps-réel du fait de son principe de mesure,
- Utilisation d'une source radioactive (césium) onéreuse et délicate à mettre en œuvre,
- Pas de contrôle du niveau d'émission, donc calibration délicate à effectuer périodiquement en laboratoire,
- Pas de connaissance exacte du volume mesuré, qui très probablement, diffère selon la densité justement,
- Durée de vie limitée.

La mesure électromagnétique propose une solution alternative, qui permettra de palier à tous les inconvénients précités. En effet, la modification du champ hyperfréquence traversant le milieu permettra de remonter à la nature de ce dernier (conductivité et permittivité). Dans ce cas, le système peut comporter une antenne en guise de capteur et fonctionner en transmission et en réflexion. Une telle méthode pourra être adaptée aux enjeux de la mesure en eau profonde, répondant ainsi aux attentes des scientifiques en termes de données collectées. **La porosité pourra ensuite être calculée à partir de la loi d'Archie.**

Contexte

Au regard de l'augmentation de la demande des mesures de paramètres *in situ* du sédiment, par exemple pour la détection de gaz libre ou d'hydrates de gaz, les techniques actuelles apparaissent limitées. Une thèse [Ref. 3], récemment présentée et menée en collaboration avec Telecom Bretagne, met en avant les possibilités d'évolution de transmission radioélectrique sur de courtes portées dans l'eau de mer. **Elle démontre notamment qu'une approche simplifiée du modèle de propagation (modèle de Debye ou plus récemment de Somaraju) peut être exploitée à la fois dans un grand domaine de fréquence, jusqu'à 12 GHz, et bien en deçà de la fréquence de relaxation de l'eau de mer (rotation de la molécule d'eau).** Cette modélisation des constantes de propagation peut être transposée dans le

sédiment (milieu à forte perte et forte conductivité). On se propose donc d'étudier la propagation d'une onde radioélectrique hyperfréquence en eau de mer ainsi que la modélisation du comportement des capteurs associés dans cet environnement (antennes envisagées pour notre étude), ce qui permettra de définir le système optimal en fonction des contraintes imposées, notamment la distance entre les antennes. **De plus, des publications récentes [Ref. 4], [Ref. 5] démontrent la faisabilité de l'exploitation de la propagation électromagnétique comme moyen pour remonter, par calcul inverse, aux paramètres physiques du milieu traversé.**

Le but essentiel de cette étude est donc de pouvoir, au travers de la mesure électromagnétique, mettre en exergue l'interaction onde-matière associée en vue d'une utilisation dans un milieu aquatique à forte profondeur. L'idée générale est d'optimiser un principe de mesure d'atténuation et de déphasage dans une bande de fréquence adaptée à la mesure dans le sédiment. Il s'agit notamment d'étudier les possibilités d'adaptation, et donc de désadaptation à ce milieu, d'un canal de transmission. La portée obtenue sera volontairement faible et précise de façon à travailler en champ confiné. Il en découle que la puissance nécessaire sera également réduite de par la portée à atteindre et que le volume sondé sera quasi-ponctuel (relativement à une épaisseur de sédiment), ce qui évitera des problèmes de type multi-trajets par exemple. Cette mesure alternative sera facilement intégrable sur les instruments actuels ou ceux de nouvelle génération. Il sera également beaucoup plus aisé d'intégrer une auto-calibration périodique en niveau d'émission *in situ*. Enfin, l'instrumentation sera faible coût, peu encombrante d'un point de vue mécanique et de faible consommation. En effet, les systèmes de transmission radioélectriques ont connu un essor considérable ces dernières années et les composants « grand public » sont aujourd'hui accessibles pour des développements électroniques jusqu'à 5 GHz. Dernier avantage à souligner, grâce à l'utilisation de composants du marché cette solution sera de bonne fiabilité et nécessitera donc peu d'interventions.

Le principe de l'étude alors proposée est de concevoir un système de liaison basé sur la propagation d'un champ électromagnétique entre deux antennes à rayonnement quasi unidirectionnel. Deux études préliminaires, menée dans le cadre de stages de Master 2, ont mis en avant les possibilités d'évolution de transmission radioélectrique sur de courtes portées dans l'eau de mer [Ref. 6], [Ref. 7].

La conception de solutions d'antennes originales est ici un point clé de l'étude. Le domaine de fréquence de transmission à exploiter est encore large à ce jour, sans doute de plusieurs octaves. Les facteurs dimensionnant de l'antenne sont un compromis entre la portée, la directivité, la tenue à la pression, la facilité d'intégration et bien sur le coût de fabrication. La démarche est sans doute de se fixer une longueur d'onde de transmission dans l'eau de mer, et ensuite d'étudier les autres facteurs déterminants (encombrement d'antenne, composants électroniques) pour chaque longueur d'onde. L'étude permettra d'aboutir à la réalisation d'un démonstrateur de transmission miniaturisé, intégrable sur pointe.

Une autre solution envisageable est la réflectométrie dans le domaine temporel [Ref. 8], [Ref. 9], appliqué au sédiment. Cette méthode, qui peut s'étendre jusqu'à quelques GHz, reprend le principe de la mesure de la déformation impulsionnelle (en niveau et en retard), en réflexion et en transmission. Plusieurs types de sondes TDR (Domain Reflectometer), sondes à deux ou trois guides d'onde, sont déjà utilisés à terre pour mesurer la permittivité et la densité volumique de sédiment (par exemple pour la surveillance des affouillements).

Dans les 2 approches, le même principe serait utilisé pour la synthèse de l'antenne, c'est à dire 2 patchs identiques montés face à face, gravés sur les cotés intérieurs d'une fourche, ce qui permettra de s'affranchir des problèmes de dépolarisation, de rayonnement et de dynamique. Les mesures seraient alors le gain et le déphasage obtenus qui subiront des modifications selon la nature du milieu excité. Le développement théorique du calcul d'inversion, afin de déduire les facteurs physiques du milieu, a démarré dans les années 1995 [Ref. 10], et les modèles inverses à utiliser sont à présent bien connus et exploités [Ref. 11].

L'étude proposée permettra ainsi d'optimiser un tel système et de le rendre indépendant de la profondeur d'utilisation.

Positionnement national

Ce projet vient s'intégrer dans un contexte national, européen et international, en proposant un nouveau principe de mesure pour l'instrumentation scientifique et permettant de plus un interfaçage élémentaire avec l'instrumentation actuelle *in situ*. Au niveau national, cette étude devrait permettre à IFREMER et ses partenaires de se doter d'un nouveau moyen de collecter en temps réel des données complémentaires à celles déjà disponibles en ce qui concerne la connaissance des fonds marins. Nombre de scientifiques sont intéressés par cette nouvelle solution potentielle. Ce capteur ne nécessitera pas de remplacement fréquent, ce qui minimisera le nombre d'interventions et donc les coûts de maintenance. Ces travaux feront l'objet de publications et communications dans les congrès sur les domaines en lien avec l'instrumentation marine et les dispositifs hyperfréquences. **De plus, cette nouvelle instrumentation pourrait faire l'objet d'un dépôt de brevet.**

Échéancier prévisionnel

1. Étude d'une première solution *in situ* consistant à exploiter la propagation d'un champ électromagnétique par l'utilisation de système guidant couplé à une antenne à rayonnement directif. L'aspect propagation de l'onde électromagnétique en eau de mer sera alors étudié en termes de performance (atténuation et vecteur d'onde). Cette étude s'effectuera en 4 parties :
 - a. Une partie purement théorique qui permettra de définir les équations et les constantes à prendre en compte dans le canal de propagation sous-marin;
 - b. La modélisation hyperfréquence permettra la confirmation des constantes prises en compte et d'affiner les dimensions réelles des futures antennes ; **le logiciel de modélisation électromagnétique « ANSYS-HFSS », déjà utilisé pour ce projet, sera exploité.**
 - c. Le concept des antennes elles-mêmes ainsi que leur système d'adaptation, fonction de la longueur d'onde et du dimensionnement de la pointe actuelle. **Ce point sera établi en collaboration entre RDT & GM.**
 - d. La simulation et l'optimisation du système complet.
2. Un couple d'antenne sera mis en œuvre pour tester et valider le modèle théorique ainsi étudié. L'aspect propagation EM sera mesuré dans différents milieux sédimentaires et les caractéristiques d'atténuation et de déphasage seront alors connues autant d'un point de vue théorique que pratique. **Ces essais feront l'objet d'une procédure établie en collaboration entre RDT & GM. Une protection de la Propriété Intellectuelle sera assurée avant publication.**
3. Le point « 2 » devra permettre de faire un choix sur la longueur d'onde, en prenant en compte l'aspect dimensionnel (miniaturisation) le plus adapté à notre transmission mais surtout en variation de transmission selon le milieu (module et phase). La seconde méthode (TDR) sera également exploitée afin de conclure sur le choix entre l'exploitation d'une onde stationnaire et une méthode impulsionnelle.
4. Une maquette d'un système complet sera réalisée et testée par RDT. Les résultats seront comparés à ceux de l'étude théorique. **Publication et présentation aux JCMMs 2018.**
5. Suivant le choix effectué sur le système final, un nouveau concept d'antenne directif sera étudié, de façon à optimiser l'espace confiné de mesure dans le milieu sédimentaire. RDT a une très bonne expérience dans le domaine de l'instrumentation avec les contraintes dues au milieu marin. **La fabrication du système pourrait alors être réalisée par un industriel ayant déjà développé des antennes spécifiques pour IFREMER-RDT.**

6. Optimisation du système, notamment choix des composants hyperfréquences intégrables dans la pointe, montage final et essais en mer. **Publication et présentation dans un colloque international.**
7. Rédaction et soutenance de la thèse. **Demande de publication dans une revue de rang « A »**

Bibliographie

- [Ref. 1] : « Le pénétrromètre Penfeld », Meunier J, Sultan N, Jegou P., SeatechWeek, – Caractérisation des fonds , 2004.
- [Ref. 2] : “A marine electromagnetic survey to detect gas hydrate at Hydrate,Ridge”, K. A. Weitemeyer, S. Constable and A. M. Tréhu, Geophysical Journal International, 2011 june.
- [Ref. 3] : « Dispositif antennaire pour radio communication sous-marine à faible portée », Hector Guarnizo, thèse du LABSTICC-TB, octobre 2013.
- [Ref. 4] : “A Survey of elastic and electromagnetic properties of Near-Surface soil”, J.C Santamarina, V. A. Rinaldi, D. Fratta, Near-Surface Geophysics: pp. 71-88, 2005
- [Ref. 5] : “Void Ratio Estimation of soft soils using electrical Resistivity cone probe ”, J.H. Kim, H-K Yoon, J-S Lee, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 137(1), 86–93, 2011
- [Ref. 6] : « Simulation et optimisation d’une antenne pour le sondage de sédiment », A. LAKROUZ, F. AFIF, R. IBEGHOUCHE, stage Master ESCO UBO, février 2012.
- [Ref. 7] : « Etude de faisabilité et simulation d’un capteur pour le sondage de sédiment », O. BUSHUEVA , stage Master ESCO UBO, juin 2012.
- [Ref. 8] : « Soil water content and dry density by time domain reflectometry », Yu, X. and Drnevich V.P., Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 9, September, pp.922-934, 2004.
- [Ref. 9] : « Measurement of Simulated Scour by Time Domain Reflectometry », Yu, Xianbu and Yu, Xiong, Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006.
- [Ref. 10] : « Influence of gravimetric water content and bulk density on the dielectric properties of soil », Perdok U. D., Kroesbergen B. and Hilhorst M.A., European Journal of Soil Science, 47, 367-371, 1996.
- [Ref. 11] : « Évaluation de l’état hydrique d’un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : Application géotechnique », Beck Y-L, thèse LCPC , 2008.
- “Electromagnetic propagation between antennas submerged in the Ocean”, M. Siegel & al, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 1973, 4, 507-513.
- « A Method for Measuring Soil Moisture Content by Time Domain Reflectometry », Ledieu, J., De Ridder, P., De Clerck, P., and Dautrebande, S., J. Hydrology, Vol, 88, pp. 319-328, 1986.
- “Conduction and Magnetic Signalling in the sea”, S. Bogie & al, The radio and electronic Engineer, 2000.
- “ Present investigations of Electromagnetic waves propagation in water and sea water”, A. Shaw & al, SSC06, Dublin, 2006 February.
- « Uncertainty effect on soil electrical conductivity and permittivity spectra », Longsdon S. D., Soil Science, 171 (10), 737-746, Octobre 2006.
- “Electromagnetic propagation through the water column», M. Rhodes & al, Hydro International, vol. 10, n°10, 2006 December.
- “Digital Underwater Communication using electric current method”, J. Joe & al, OCEANS07, Aberdeen, 2007 June.
- “ WIFI sous-marin haut débit, étude préliminaire du milieu et des antennes », W. El Hajj, SeaTech Week, octobre 2008.
- « Microwave Sensor for Simultaneous and Nondestructive Determination of Moisture Content and Bulk Density of Granular Materials », Samir Trabelsi S., and Stuart. O. Nelson, Proceedings of the 40th European Microwave Conference, 2010.

6. Résumé du projet

L'étude des systèmes sédimentaires marins et l'évaluation des aléas géologiques associés (tremblement de terre, tsunami...) nécessitent une caractérisation des propriétés physiques et mécaniques du milieu (notamment conductivité et densité du sédiment). Ceci peut se faire en laboratoire sur des échantillons sédimentaires obtenus par carottage, s'accompagnant souvent de perturbations non négligeables. Les mesures *in situ* permettent de s'affranchir de ce problème. Elles nécessitent un vecteur capable d'enfoncer et de placer le capteur à une certaine profondeur sous le fond de mer. Peu d'équipements sont aptes à assurer des mesures avec une telle contrainte. A l'IFREMER, un seul instrument peut être déployé et exploité pour effectuer ces mesures, le pénétrromètre PENFELD. Ce dernier, lors de sa conception, a été doté de capteurs issus de la technologie d'équipements existants. Ces capteurs présentent plusieurs inconvénients : une acquisition qui ne peut être faite en temps réel et le fait qu'ils ne permettent pas la connaissance simultanée de l'ensemble des paramètres indispensables aux diverses applications. Les objectifs de ces travaux concernent la faisabilité et la mise en œuvre d'un nouveau capteur électromagnétique, permettant de remonter à la densité volumique du milieu et présentant une taille adaptée à la pointe du pénétrromètre en vue d'une utilisation dans un milieu aquatique à forte profondeur. Cette solution devrait permettre de palier à tous les inconvénients précités.

Mots clés : densité volumique, conductivité, capteurs, dispositifs micro-ondes, interaction onde-matière, antenne immergée

7. Partenariat

- IFREMER – Bretagne
- Lac-STICC - UBO