
Conception d'un système expérimental de laboratoire pour la mesure des propriétés acoustiques de sols à forte teneur en eau

Vanessa Martin*, — Alain Alexis* — Philippe Poullain* — Roger Coué***

**Laboratoire GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique – UMR CNRS 6183*

Département Génie Civil

IUT de Saint Nazaire

58 rue Michel Ange

44600 Saint Nazaire

vanessa.martin@univ-nantes.fr, alain.alexis@univ-nantes.fr, philippe.poullain@univ-nantes.fr, roger.coue@univ-nantes.fr

***EDF R&D - Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement*

6 quai Watier

78400 Chatou

RÉSUMÉ. La connaissance des propriétés acoustiques des sédiments est un élément clé dans l'interprétation des mesures des appareils de géophysique de type sondeurs de sédiments. Les approches théoriques pour ces propriétés acoustiques sont variées. En revanche, les approches expérimentales de laboratoire sont extrêmement rares dans la littérature. Un système de mesure de laboratoire est développé pour la validation de modèles de propagation d'ondes acoustiques dans les sols à forte teneur en eau.

ABSTRACT. The knowledge of the acoustic properties of sediments is a key element in the interpretation of measurements performed by geophysical instruments such as sub bottom profilers. There are various theoretical approaches for these acoustic properties. However, experimental approaches are extremely rare in the literature. A laboratory experimental set-up is developed in order to validate acoustic wave propagation models in high-water-content soils.

MOTS-CLÉS : propagation d'ondes, acoustique, sédiments, mesure, atténuation, célérité.

KEYWORDS: wave propagation, acoustic, sediments, measurements, attenuation, sound speed.

1. Introduction

L'empreinte acoustique des matériaux dépend de plusieurs paramètres, et en particulier de leur nature physique. Les sédiments sont des matériaux complexes, mélanges d'argiles, de limons, et de sables. Les relations qui lient propriétés acoustiques et propriétés physiques des sédiments ne sont pas encore aujourd'hui connues. L'étude vise à améliorer la connaissance du comportement de ces milieux poreux à très forte teneur en eau sous sollicitation acoustique.

La technique de reconnaissance géophysique par onde de compression, utilisée par les sondeurs de sédiment, fournit des renseignements acoustiques sur les fonds (fonds marins ou fonds de retenues de barrage). La problématique consiste, pour des raisons de qualité environnementale, à chercher à obtenir des renseignements sur la nature des sédiments des fonds à partir des renseignements acoustiques fournis par les sondeurs de sédiments. L'atténuation des matériaux dépend de sa nature, et est donc une propriété qu'il est capital d'estimer si l'on veut émettre des hypothèses sur la nature du matériau par des mesures acoustiques à distance.

2. Contexte

Historiquement, des mesures de propagation d'ondes acoustiques sur des sédiments à forte teneur en eau ont été effectuées sur de larges bandes de fréquence. Ces mesures sont l'atténuation intrinsèque due à la propagation dans le matériau, et la célérité des ondes, principalement. Hamilton (Hamilton, 1972) en fit directement sur le fond marin, pour des fréquences allant de 3 à 100 kHz, mais le manque de précision sur les conditions d'essais dans les articles rend ces mesures inexploitable. Quelques chercheurs en réalisèrent en laboratoire, avec des ultrasons. Cependant, il est probable que le comportement d'un sédiment granulaire soumis à des ultrasons diffère de son comportement lorsqu'il est soumis à des ondes sonores, à cause de la taille des grains qui est négligeable devant la longueur d'onde dans ce dernier cas.

Biot (Biot, 1956) a développé un modèle de propagation d'onde dans les milieux poreux, qui a été étendu par Stoll (Stoll, 1980) aux sédiments marins. Ce modèle nécessite la connaissance d'un grand nombre de paramètres difficilement mesurables. Hamilton (Hamilton, 1972) a développé un modèle empirique à partir de ses mesures in situ. Les modèles de propagation d'ondes dans les suspensions repris par Anderson et Hampton (Anderson et al., 1980) permettent d'approcher le comportement des sédiments à très forte teneur en eau. Dans ce modèle, la diffusion de l'énergie par les particules et la viscosité sont responsables de l'atténuation des ondes. Enfin, Buckingham (Buckingham, 1998) a fourni une analyse des principaux mécanismes d'atténuation dans les sédiments et a développé un modèle original basé sur l'hypothèse que les sédiments sont des milieux poreux qui ne présentent *a priori* pas de squelette rigide. Cependant, aucun modèle ne permet aujourd'hui d'appréhender clairement les propriétés physiques des sols (granulométrie, masse

volumique) à partir de ses propriétés acoustiques (célérité, atténuation) mesurées in situ.

La problématique scientifique actuelle consiste à obtenir des résultats en laboratoire applicables aux mesures in situ. Pour la robustesse des études, il faut que les essais de laboratoire soient effectués dans les mêmes gammes de fréquences que les sondeurs de sédiments (env. 1-20 kHz, appelées basses fréquences ou fréquences acoustiques), de manière à pouvoir exploiter de manière fiable les sismogrammes issus de ces sondeurs. La littérature est extrêmement pauvre à ce sujet. Seul un système de mesure a été reporté par Stevenson (Stevenson, 1999) qui permet de mesurer atténuation et célérité des sols à forte teneur en eau à basses fréquences. Mais il semble que le système soit aujourd'hui encore en cours de développement, et très peu de renseignements sont donnés à son sujet. La difficulté consiste donc à développer un système de mesure de laboratoire opérationnel fiable qui nous permet d'estimer la célérité et surtout l'atténuation dans les sols à forte teneur en eau.

3. Conception du système de mesure

3.1. Introduction

Deux dispositifs expérimentaux ont été développés dans le but d'estimer les propriétés acoustiques de sols à forte teneur en eau en les sollicitant avec des ondes de compression dont les fréquences sont comprises entre 1 kHz et 20 kHz. Les signaux émis sont des signaux sinusoïdaux purs. Le premier système permet de mesurer la célérité avec précision, tandis que le second, qui constitue une amélioration du premier, permet de mesurer à la fois la célérité et l'atténuation. Les deux dispositifs ont en commun le système d'émission des signaux et de réception des signaux.

Parallèlement à ces mesures de propriétés acoustiques, la teneur en eau et la courbe granulométrique des échantillons sont mesurées en laboratoire.

Les sols testés ont des teneurs en eau qui varient entre 100 % et 600 %. Ils sont stables (au sens de la sédimentation-consolidation sous poids propre) mais ont besoin d'être maintenus dans une enveloppe en raison de leur faible résistance. Les échantillons sont cylindriques, de diamètre constant, et de longueurs variables. Ils constituent un guide d'onde, dans lequel va s'établir un système d'ondes stationnaires.

3.1.1. Emission

Le dispositif d'émission est constitué d'un générateur de signaux, d'un amplificateur, et d'un vibreur sur lequel repose l'échantillon. La plaque circulaire, rigide et solidaire du vibreur, est la source de type piston qui va exciter l'échantillon. Cette plaque est équipée d'un accéléromètre qui mesure le signal imposé à

l'échantillon. Le couplage entre l'émetteur et l'échantillon est réalisé par un gel d'échographie (pour un meilleur contact) et par un film de plastique souple (qui constitue la partie inférieure de l'enveloppe).

3.1.2. Réception

Un accéléromètre est solidaire d'une plaque rigide posée sur l'échantillon, via également un film souple et une fine couche de gel. Le signal transmis à l'accéléromètre est ensuite envoyé à l'oscilloscope. Le signal retenu correspond à une moyenne sur un grand nombre de périodes (au moins 100).

3.2. Premier système de mesure

3.2.1. Présentation du système

Le premier dispositif expérimental a été mis au point dans le but de mesurer la célérité des ondes qui se propagent dans un matériau donné. Le matériau est confiné dans un tube de PVC de 10 cm de diamètre et de 10,15 ou 20 cm de hauteur. Une attention particulière est portée à l'absence de bulles d'air dans l'échantillon.

3.2.2. Analyse des mesures

Ce système permet de mesurer des célérités avec une précision satisfaisante en supposant que la célérité n'est pas dispersive (indépendante de la fréquence des ondes émises), ce qui est justifié sur la gamme étroite de fréquences utilisées.

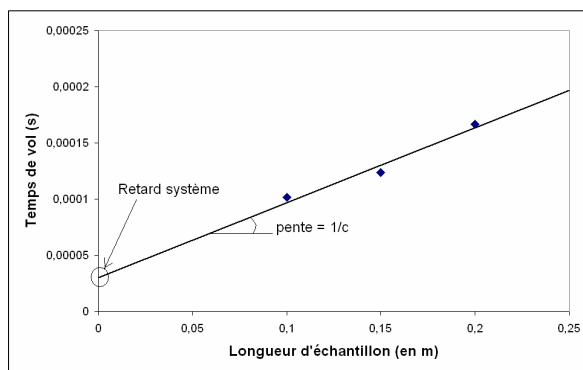


Figure 1. Schéma du principe d'estimation de la célérité

La mesure de la célérité est réalisée à l'aide:

- du déphasage entre les signaux émis et transmis, lorsqu'ils sont quasi-sinusoidaux,
- de la durée de parcours dans l'échantillon (temps de vol), lorsque le signal d'entrée est un Dirac.

Pour améliorer le degré de confiance, les mesures sont effectuées sur trois longueurs d'échantillon différentes. Cette méthode de mesure intègre à la fois les incertitudes de préparation-conditionnement d'échantillon et de mesure acoustique. Le tracé des temps de vol en fonction de la longueur d'échantillon permet à la fois de déterminer le retard système (temps de réponse des éléments électromécaniques du système de mesure) et la célérité, grâce à la pente de la droite de corrélation des trois points (Figure 1).

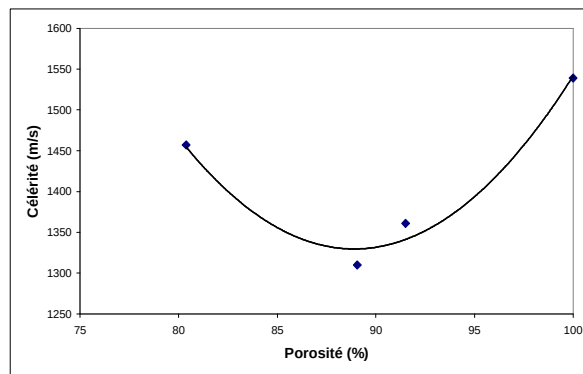


Figure 2. *Mesures de la célérité en fonction de la porosité*

Des points de mesure de célérités, obtenues avec la méthode décrite précédemment, pour une plusieurs porosités, sont présentés Figure 2. La présence d'un minimum semble apparaître sur la courbe de tendance, ce qui semble vérifié également par les travaux de Wood (Anderson et al. 1980).

3.3. Second système de mesure

3.3.1. Présentation du système et détail des contraintes

Ce second dispositif expérimental, présenté Figure 3, a été développé dans le but d'estimer à la fois la célérité et l'atténuation de sols à forte teneur en eau.

Le matériau étant complexe par nature, nous souhaitons utiliser un dépouillement basé sur le modèle simple de la propagation d'une onde plane quasi stationnaire.

Pour cela nous devons nous assurer de la validité de l'hypothèse des ondes planes dans le guide d'onde cylindrique constitué par l'enveloppe du matériau, en adaptant ses dimensions à la gamme de fréquence émise.

En champ libre, les ondes peuvent être considérées comme planes lorsqu'elles sont étudiées à une distance suffisamment importante de la source. Dans cette zone, appelée champ lointain, l'intensité du champ acoustique décroît proportionnellement au carré de la distance à la source. La limite entre le champ proche et champ lointain (x_{lim}), dans le cas d'une source de type piston, est fonction diamètre de la source (D_{source}) et la longueur d'onde (λ) suivant l'expression : $x_{\text{lim}} = D_{\text{source}}^2 / \lambda$. L'hypothèse des ondes planes est alors valide, en première approximation, lorsque le capteur est placé dans le champ lointain.

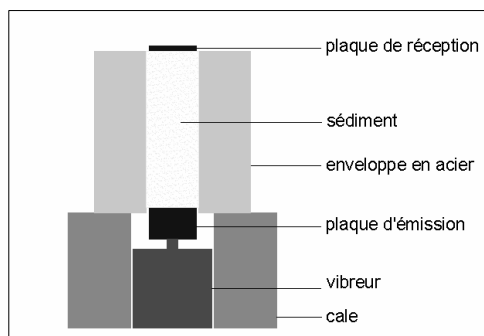


Figure 3. Schéma du second dispositif expérimental

En revanche, dans un guide d'onde (avec des parois autour de l'échantillon), on peut supposer les ondes planes si :

- (A) les dimensions transverses du guide sont petites par rapport à la longueur d'onde, $D \ll \lambda$,

et si les trois conditions suivantes sont respectées (Morse et al. 1986) :

- (B) l'enveloppe est supposée parfaitement rigide.
- (C) les pertes d'énergie à l'interface matériau-enveloppe sont négligeables.
- (D) le diamètre de l'enveloppe est constant.

Plus loin dans leur ouvrage, les auteurs précisent que seule l'onde plane se propage dans un guide d'onde si la fréquence d'émission est inférieure aux fréquences de coupure des modes non plans (f_c), qui est fonction de la célérité du matériau (c) et du diamètre de l'échantillon (D) : $f_c = c/2D$.

Or si l'on respecte $D \ll \lambda$ (condition (A)), alors $f \ll f_c$ est de fait respectée. Le diamètre de l'échantillon a été réduit : $D = 5$ cm et donc $f_c = 15$ kHz.

Ce second dispositif expérimental, présenté Figure 3, a été conçu de sorte que les conditions citées soient respectées. Pour un diamètre d'échantillon de 5 cm, l'hypothèse des ondes planes est donc supposée valide pour des fréquences inférieures à 15 kHz. Elle sera vérifiée théoriquement en estimant la distance d'atténuation des modes non plans, et expérimentalement par l'observation de l'allure des pics de résonance sur les spectres.

Pour satisfaire la condition (B) et pour éviter que l'enveloppe contenant l'échantillon puisse entrer en vibration, et venir perturber le signal transmis, le système initial a été amélioré : une enveloppe en acier massif a été choisie (diamètre extérieur 15 cm). L'impédance acoustique de l'acier étant fort différente de celle des sédiments, peu d'énergie sera transmise latéralement et perdue dans l'enveloppe.

3.3.2. Analyse des mesures

Le vibreur électromécanique ne permet pas d'émettre un signal sinusoïdal pur dès le début de sa mise en marche (premières périodes). De ce fait, il est nécessaire de travailler en régime entretenu (système d'ondes stationnaires établies dans le guide d'ondes). Le dépouillement de ces mesures s'effectue dans le domaine spectral et un filtre passe-bas est imposé à l'ensemble des signaux enregistrés.

Ce second système permet, comme le premier, de mesurer la célérité, et avec la même méthode. Cependant, ces méthodes d'analyse temporelles sont adaptées à l'estimation de la célérité mais pas à l'estimation de l'atténuation.

En effet, l'estimation de l'atténuation est beaucoup plus délicate et ne peut pas s'obtenir directement. Elle nécessite de mettre au point un modèle de propagation d'onde dans le matériau, dans cette configuration géométrique précise, en posant des hypothèses sur le comportement du matériau. Ce modèle permet alors :

- d'effectuer une analyse inverse des mesures brutes des signaux émis et transmis,
- d'en extraire l'atténuation intrinsèque du matériau testé,
- de déterminer la célérité à plusieurs fréquences, et d'étudier sa dispersion.

5. Conclusion et perspectives

Deux systèmes de mesure ont été mis en place, après analyse des différentes contraintes dues, en grande partie, à la faisabilité du dépouillement de ces mesures. Ces systèmes sont originaux et permettent de mesurer pour la première fois les propriétés acoustiques des sols à forte teneur en eau.

Pour la validation des deux systèmes de mesure, un matériau de référence viscoélastique, de célérité proche de celle de l'eau, et de propriétés acoustiques connues, pourra être testé. Nous projetons ensuite une étude paramétrique sur des échantillons constitués uniquement d'argile (homogène et isotrope) à différentes teneurs en eau.

Ces travaux devront permettre de critiquer les modèles évoqués précédemment, et éventuellement de choisir le plus représentatif du comportement du matériau naturel. Ils permettront alors d'améliorer la connaissance des relations entre propriétés physiques et propriétés acoustiques des sédiments. Les résultats de cette étude contribueront à alimenter des modèles d'analyse inverse qui sont utilisés dans l'interprétation des sismogrammes générés par les mesures des sondeurs de sédiments, et contribueront donc à la connaissance de la quantité et de la nature des sédiments déposés au fond des retenues de barrage.

Remerciements

Les contributions du Dr. Philippe Lafon, EDF R&D, dans la mise au point du second système expérimental ont été déterminantes. Nous le remercions pour ses conseils d'acousticien expert et pour son avis critique enrichissant sur nos travaux.

6. Bibliographie

- Anderson A.L., Hampton L.D., « Acoustics of gas-bearing sediments I. Background », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.67, 1980, p. 1865-1889.
- Biot M.A., « Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. A. Low frequency range », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.28, 1956, p. 168-191.
- Buckingham M.J., « Theory of compressional and shear waves in fluidlike marine sediments », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.103, 1998, p. 288-299.
- Hamilton E.L., « Compressional wave attenuation in marine sediments », *Geophysics*, vol.37, 1972, p. 620-646.
- Morse P.M., Ingard K.U., *Theoretical Acoustics*, Princeton University Press, 1986.
- Stevenson I.R., The application of high-resolution geophysical techniques for seismic stratigraphic analysis at an outcrop scale : A study from the Namaqualand continental shelf, west coast of South Africa, PhD thesis, 1999.
- Stoll R.D., « Marine sediment acoustics », *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.77, 1985, p. 1789-1799.