

Vitesse du son dans les sédiments marins durant les premiers stades du tassement

Sound velocity in marine sediments
during the early stages of settling

P. GUILLAUME, P. MORLIER, C. VIGUIER

Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Géotechniques et Géophysique Appliquée*

Rev. Franç. Géotech. n° 57, pp. 49-57 (octobre 1991)

Résumé

La vitesse du son est mesurée dans des sédiments marins lors d'une étude expérimentale du tassement. Durant la phase de sédimentation, la vitesse du son diminue légèrement, puis lors de la phase de compaction elle s'accroît avec la charge et la réduction de porosité (modèles de WOOD (1941) et de NOBES (1989)). Le suivi du phénomène met en évidence le réarrangement graduel de la structure des particules et l'apparition de la rigidité pour une porosité seuil (environ 0,70). La différence de comportement acoustique entre les matériaux argileux et carbonatés résulte essentiellement de la granulométrie qui contrôle la réorganisation des grains.

Abstract

An experimental study which measure the sound velocity during the settling of marine sediments is presented. In the first step the sound velocity slightly decrease during decantation stage, in the second step it increases with loading and porosity reduction during compaction stage (WOOD (1941) and NOBES (1989) models). The follow of the process shows the progressive rearrangement of particules structure and the acquisition of rigidity appears at a threshold porosity (about 0.70). Acoustical behaviour of argileous and calcareous sediments mainly differs owing to grain-size distribution which control the particles reorganization.

* 351, cours de la Libération, 33405 Talence.

1. INTRODUCTION

Des sédiments marins carottés lors des missions océanographiques Caracolante 1 et 2 réalisées par l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine en 1981 et 1985 dans le domaine Caraïbe (Bassin Vénézuélien, Prisme de la Barbade et littoral de la Martinique), ont donné lieu à une analyse sédimentologique et géotechnique, dans le but de préciser les interactions entre le milieu de dépôt et les caractéristiques géomécaniques. Les résultats obtenus ont montré d'une part l'importance de la composition granulométrique et minéralogique dans le comportement géotechnique de matériaux (notamment de la présence d'une teneur en carbonate supérieure à 40 %) et d'autre part l'influence des processus de dépôt marquée à travers l'arrangement des particules (GUILLAUME, 1990). Ceci nous a conduit à examiner les mécanismes régissant le mode de « fabrication » des sols argileux et/ou carbonatés, à la fois sur des sédiments naturels et sur des sédiments reconstitués. Nous avons donc réalisé une étude expérimentale de la sédimentation et des premiers stades de la compaction simulant l'enfouissement progressif des sédiments. L'utilisation d'une méthode d'investigation indirecte telle que la mesure de la vitesse du son, permet alors de visualiser les processus mis en jeu lors du passage fluide — suspension — solide, sans perturber la structure du matériau. On peut ainsi suivre l'évolution des relations entre la phase liquide et les particules solides durant la sédimentation et le début de la compaction.

2. RAPPELS THÉORIQUES

Un matériau sédimentaire sous-marin constitue un milieu où les particules sont plus ou moins en contact dans un fluide. Au point de vue de son comportement acoustique, il est considéré, selon sa porosité (n), soit comme une suspension de particules ($n > 0,5$), soit comme un solide poreux ($n < 0,3$) où les grains ne sont plus indépendants les uns des autres. Les sédiments que nous avons analysés possédant une porosité élevée, les théories concernant les suspensions et les agrégats granulaires sont mieux adaptées que celles des milieux poreux.

Dans les suspensions et émulsions, la vitesse du son évolue selon une loi simple de mélange à deux composantes (WOOD, 1941) :

$$V_L = \left[\frac{1}{[\rho_w \cdot n + \rho_s (1 - n)] [k_w \cdot n + k_s (1 - n)]} \right]^{1/2}$$

la masse volumique de la solution : $\rho = \rho_w \cdot n + \rho_s (1 - n)$, avec ρ_w la masse volumique du liquide, ρ_s la masse volumique des grains et n la porosité du milieu ($n = V_{\text{eau}}/V_{\text{total}}$) et la compressibilité du système : $k = k_w \cdot n + k_s (1 - n)$, avec k_w la compressibilité du liquide et k_s la compressibilité du solide.

Or d'une manière générale, les mesures expérimentales de célérité des ondes sur des sédiments naturels donnent des valeurs supérieures à celles de WOOD (GREFFARD, 1969 ; HAMILTON et al., 1982 ; BACHMAN, 1985 ; ORSI et DUNN, 1990...). LAUGHTON (1957) à partir de l'étude de la compaction de divers sédiments naturels introduit pour sa part le concept d'incompressibilité de structure $k = k_w \cdot n + k_s (1 - n) + k_c$, et SHUMWAY (1960) suppose un coefficient de rigidité μ .

$$V_L = \left[\frac{1}{[\rho_w \cdot n + \rho_s (1 - n)] \left(\frac{1}{k_w \cdot n + k_s (1 - n)} + \frac{4}{3} \mu \right)} \right]^{1/2}$$

Des théories sur les milieux poreux saturés, nous retiendrons le modèle de WYLLIE et al. (1956) qui prend en compte le comportement propre à chaque phase, liquide ou solide, à travers la relation suivante :

$$\frac{1}{V_L} = \frac{n}{V_w} + \frac{1 - n}{V_s}$$

n : porosité ;
 V_L : vitesse dans la solution ;
 V_w : vitesse dans le fluide ;
 V_s : vitesse dans les grains.

NOBES (1989) propose ensuite une combinaison des modèles de WOOD et de WYLLIE qui considère le fluide comme une suspension et les particules comme des matériaux poreux :

$$\frac{1}{V_L} = \frac{n}{V_{\text{Wood}}} + \frac{1 - n}{V_{\text{Wyllie}}}$$

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Le matériel

Un œdomètre est équipé d'un système de mesure de la vitesse des ondes acoustiques, permettant une double utilisation en colonne de décantation et cellule œdométrique. Dans cette cellule de mesure de 50 mm de diamètre et 20 mm de hauteur, deux capteurs ultrasoniques sont diamétralement opposés dans un plan horizontal (fig. 1). Les transducteurs utilisés sont des céramiques piézoélectriques cylindriques de fréquence 300 kHz vibrant dans le sens de l'épaisseur. La distance entre les deux transducteurs étant constante, on peut déterminer à chaque instant la célérité des ondes longitudinales à travers le matériau. La cellule est surmontée d'un tube en plexiglass de 50 cm de haut pour l'essai de sédimentation ou de 2,5 cm pour l'essai de compaction.

Lors de la phase de sédimentation, l'appareil est rempli d'eau de salinité de 35 ‰ pour l'étalonnage des mesures de vitesse du son. Puis les particules sont mises en dispersion, la hauteur du floculat ainsi que la célérité des ondes longitudinales à la base de l'éprouvette sont mesurées en fonction du temps (fig. 2). L'essai

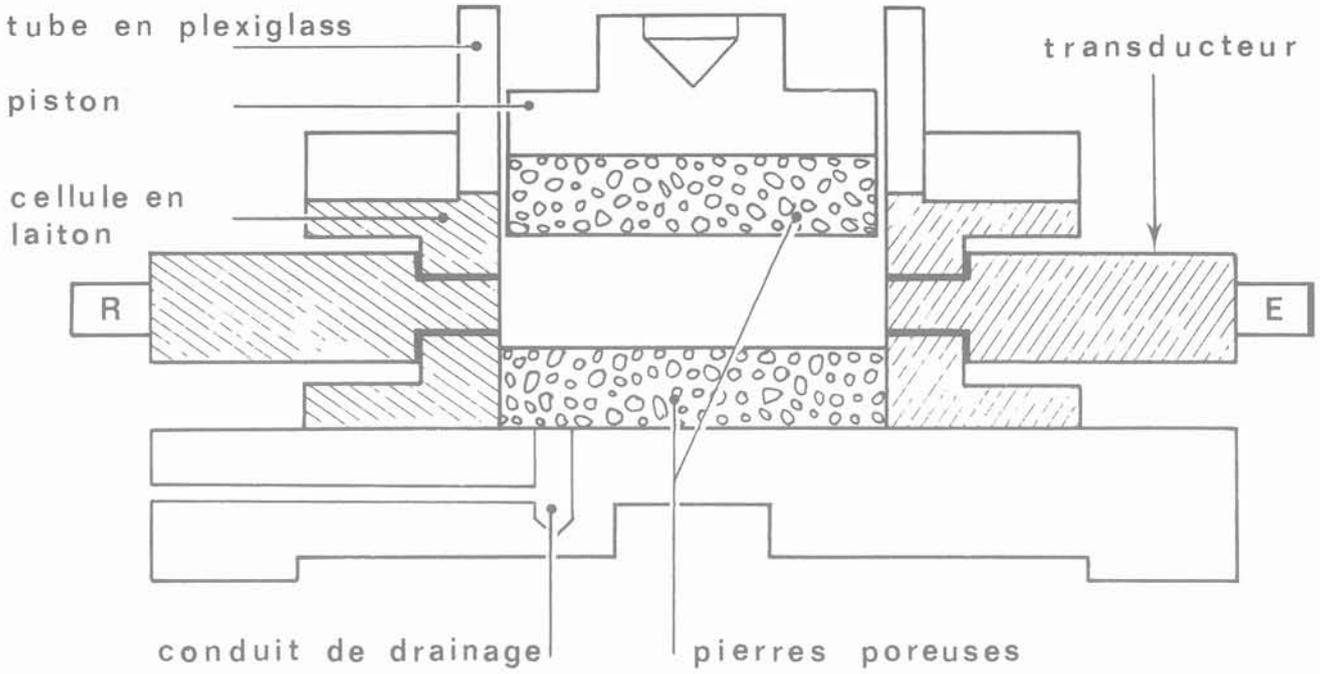


Fig. 1. — Schéma de l'œdomètre.

Fig. 1. — Schematic view of the oedometer.

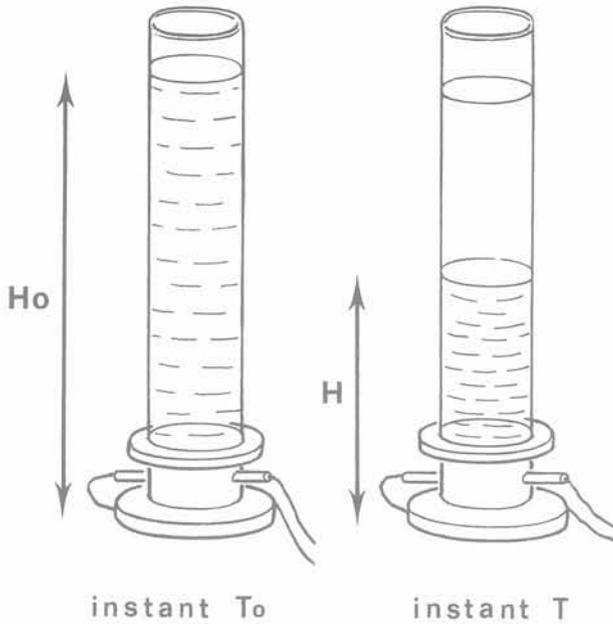


Fig. 2. — Schéma de mesure du tassement.
Fig. 2. — Diagram of the settling measurement.

finit quand la hauteur du dépôt atteint la stabilité après une durée de l'essai qui dépend de la granulométrie du matériau : une journée pour les sables, une semaine pour les échantillons argileux. L'évaluation du tassement se fait par mesure de la hauteur relative de la solution (MIGNIOT, 1968) :

$$T (\%) = \frac{H}{H_0} \times 100$$

T : tassement (%) ;
H : hauteur de la solution ;
H₀ : hauteur initiale de la solution.

L'essai œdométrique se déroule en suivant deux cycles charge-décharge ($\Delta\sigma/\sigma = 1$, durée de charge 24 h, contrainte maximale 2 MPa). La durée de l'essai complet est d'environ 15 jours.

3.2. Les sédiments

Les matériaux étudiés sont des échantillons naturels de granulométrie et de teneur en carbonate variées provenant du domaine Caraïbe ainsi que des mélanges réalisés à partir de sédiments argileux et de particules carbonatées. Ils se répartissent en trois classes (leurs caractéristiques sont représentées sur le tableau 1) :

- sables carbonatés ($\text{CaCO}_3 \approx 70\%$) : SC1-SC2 ;
- silts sableux carbonatés ($\text{CaCO}_3 \approx 60\%$) : SS1-SS2-SS3 ;
- argiles silteuses ($\text{CaCO}_3 : 25-35\%$) : AS1-AS2-AS3-AS4).

4. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DU TASSEMENT

Durant la phase de sédimentation, la hauteur relative H/H_0 en fonction du logarithme du temps (fig. 3) se traduit par une courbe sigmoïde classique plus ou moins accentuée selon la granulométrie du matériau et sa concentration initiale (MIGNIOT, 1968). Le tassement par décantation est complété par l'essai œdométrique. Les deux comportements à la compaction représentés sont typiques de la granulométrie et de la nature des deux catégories de matériaux fins testés (fig. 4). Les échantillons argileux (AS4) possèdent un comportement de type « normal » et celui des silts carbonatés (SS3) est de type « fragile » caractérisé par la rupture des particules (GUILLAUME, 1990).

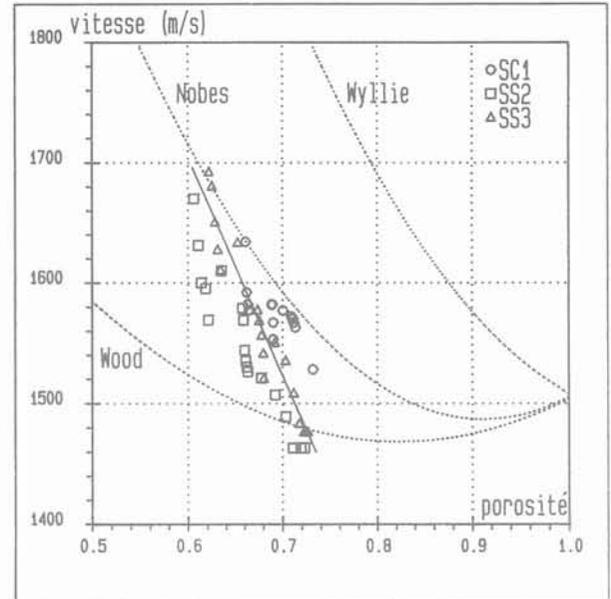
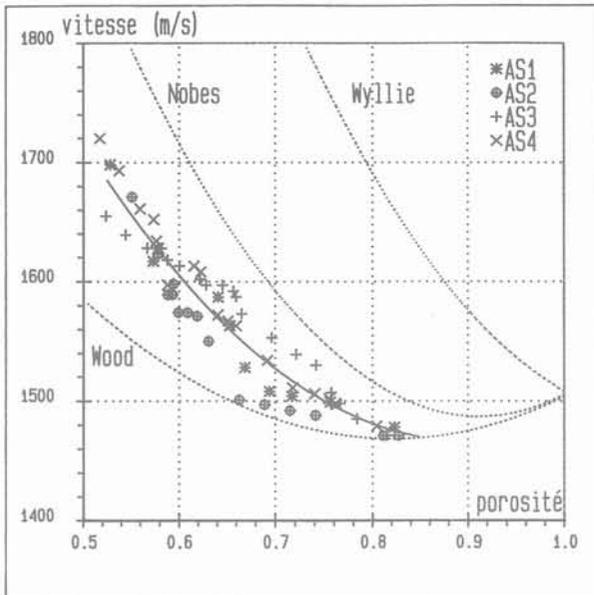


Fig. 7. — Diagramme vitesse du son-porosité : a. Sédiments argileux. b. Sédiments carbonatés.
Fig. 7. — Graph sound velocity versus porosity : a. Argillaceous sediments. b. Calcareous sediments.

7. CONCLUSION

La mesure de la vitesse du son durant les premiers stades du tassement expérimental de sédiments marins permet de suivre sous charge les relations entre la phase solide et le liquide. Le changement d'état des matériaux apparaît dès les faibles contraintes (inférieures à 100 kPa) et traduit l'acquisition de la cohésion et de la rigidité résultant du réarrangement des particules.

Cette étude confirme pour les sédiments argileux la relation vitesse du son-porosité : diminution de la vitesse du son lors de la sédimentation puis augmentation lors de la compaction (modèles de WOOD et de NOBES). Par contre, pour les silts sableux carbonatés l'accroissement de vitesse est plus rapide en raison d'une granulométrie plus grossière.

BIBLIOGRAPHIE

- BACHMAN R.T. (1985), *Acoustic and physical property relationship in marine sediment*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 78, n° 22, 1985, p. 616-621.
- BENNET R.H., BRYANT W.R., KELLER G.H. (1981), *Clay fabric of selected submarine sediments : fundamental properties and models*. J. Sed. Pet., vol. 51, n° 1, p. 217-232.
- GREFFARD J. (1969), *Contribution à l'étude des relations entre la propagation du son et la nature physico-chimique des sédiments marins*. Cahier Océan., Paris XXI^e année, n° 2, p. 145-171.
- GUILLAUME P. (1990), *Etude des caractéristiques géotechniques de sols sous-marins du Domaine Caraïbe : rapports à la sédimentogenèse et aux facteurs géochimiques*. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 1990, 258 p.
- HAMILTON E.L. (1985), *Sound velocity as a function of depth in marine sediments*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 78, n° 4, 1985, p. 1348-1335.
- HAMILTON E.L. et al. (1982), *Acoustic and related properties of calcareous deep-sea sediments*. J. Sed. Pet., vol. 52, n° 3, 1982, p. 733-753.
- KIM D.C., MANGHNANI M.H., SCHLANGER S. (1985), *The role of diagenesis in the development of physical properties of deep-sea carbonate sediments*. Mar. Geol., vol. 69, 1985, p. 69-91.
- LAUGHTON A.S. (1957), *Sound propagation in compacted ocean sediments*. Geophysics, vol. 22, n°2, 1957, p. 233-260.
- MARTIN R.T. (1965), *Quantitative measurements of wet clay fabric*. North Am. Clay Miner. Conf., 14th, Berkeley, 1965, 31 p.
- MEADE R.H. (1986), *Factors influencing the early stages of the compaction of clays and sands-review*. J. Sed. Pet., vol. 36, n° 4, 1966, p. 1085-1101.
- MIGNIOT C. (1968), *Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et leur comportement sous des actions hydrodynamiques*. La Houille Blanche, n° spécial 7, 1968, p. 591-620.
- MILHOLLAND P.D. et al. (1980), *Geoacoustic modeling of deep-sea carbonate sediments*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 68, 1980, p. 1351-1360.
- MIZIKOS J.P. (1972), *Propriétés mécaniques et physiques des sédiments marins meubles*. Thèse doct. ès Sciences, Nice, 1972, 203 p.
- NOBES D.C. (1989), *A test of a simple model of the acoustic velocity in marine sediment*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 86, n° 1, 1989, p. 291-294.
- O'BRIEN N.R. (1963), *A study of fissility in argillaceous rocks*. Ph. D. Thesis, Univ. Illinois, Urbana, 1963, 80 p.

- ORSI T.H., DUNN D.A. (1990), *Sound velocity et related properties of fine-grained abyssal sediments from the Brazil Basin (South Atlantic Ocean)*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 88, n° 3, 1990, p. 1536-1542.
- RIEKE H.H., CHILINGARIAN G.V. (1974), *Compaction of argilous sediments*. Developments in Sedimentology n° 16. Elsevier, 1974, 424 p.
- SHUMWAY G. (1960), *Sound speed and absorption studies of marine sediment by resonance method*. Part. I : Geophysics, vol. 25, n° 2, 1960, p. 451-467. Part II : Geophysics, vol. 25, n° 3, 1960, p. 659-692.
- WOOD A.B. (1941), *A text book of sound*. G. Belle and sons, London, 1941.
- WYLLIE M.R., GARDNER G.H., GREGORY A.R. (1962), *Studies of elastic wave attenuation in porous media*. Geophysics, vol. 27, 1962, p. 569-589.