



# Étude expérimentale de la célérité des ondes ultrasonores au travers de sédiments marins soumis à des pressions interstitielles et des contraintes effectives variables

J. Patot, J. Bresson, A. Daïf, J. Longuemard

## ► To cite this version:

J. Patot, J. Bresson, A. Daïf, J. Longuemard. Étude expérimentale de la célérité des ondes ultrasonores au travers de sédiments marins soumis à des pressions interstitielles et des contraintes effectives variables. *Journal de Physique III*, EDP Sciences, 1993, 3 (5), pp.985-994. <10.1051/jp3:1993176>. <jpa-00248976>

HAL Id: **jpa-00248976**

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00248976>

Submitted on 1 Jan 1993

**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.



Classification

*Physics Abstracts*

43.30 — 46.30

## **Etude expérimentale de la célérité des ondes ultrasonores au travers de sédiments marins soumis à des pressions interstitielles et des contraintes effectives variables**

J. J. Patot <sup>(1)</sup>, J. Bresson <sup>(1)</sup>, A. Daïf <sup>(1)</sup> et J. P. Longuemard <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> L.M.A.I., Université de Perpignan, 66860 Perpignan, France

<sup>(2)</sup> L.E.P.A.P., Ecole Centrale, 92292 Chatenay Malabry, France

*(Reçu le 10 novembre 1992, révisé le 25 janvier 1993, accepté le 11 février 1993)*

**Résumé.** — Les conditions ambiantes (pression, contrainte, température) existantes dans les grands fonds marins influencent la propagation des ondes acoustiques. L'exploitation d'un « simulateur environnemental » mis au point au L.M.A.I. a permis l'élaboration d'un premier modèle de propagation d'ondes ultrasonores à travers des sédiments pulvérulents [1]. Une campagne d'essais complémentaires sur des matériaux argileux et sableux permet de dégager une loi universelle du comportement géoacoustique des milieux considérés.

**Abstract.** — The located conditions (hydraulic pressure, stress, temperature) which exist in the ocean deeps influence the acoustic waves propagation. The exploitation of an experimental apparatus representing these conditions, has allowed the elaboration of a first model for the acoustic waves propagation through permeable saturated sand [1]. Complementary tries upon clay bearing and sandy materials allow to declare a universal law about the geoacoustic behaviour of the considered environments.

### **1. Introduction.**

La caractérisation des fonds marins par leur comportement acoustique est actuellement un procédé connu. Cette méthode nécessite beaucoup moins de moyens et de temps que les carottages habituellement réalisés. En outre, le sédiment est défini par des paramètres issus de mesures *in situ* ne faisant intervenir aucun remaniement. Les propriétés du sédiment en place sont mieux cernées.

La propagation des ondes de compression à basses fréquences est influencée par la nature géologique et physico-chimique du sédiment mais aussi par les paramètres ambients (immersion des sédiments et contraintes engendrées par l'enfoncement des couches sédimentaires).

Beaucoup de mesures en laboratoire sont effectuées sur des sédiments à pression atmosphérique, dans les conditions bien éloignées de la réalité. Il est donc intéressant de quantifier l'évolution de la célérité des ondes ultrasonores en fonction des variations de la

pression du fluide à l'intérieur des pores ou pression interstitielle et de la pression à laquelle est soumis le squelette solide ou contrainte effective. Pour cela, nous avons conçu un « simulateur environnemental des sédiments sous-marins » [1, 2] permettant de se replacer dans les conditions de pressions rencontrées *in situ*. Les premiers résultats obtenus (eau et sable) nous ont permis d'aborder le problème. Cette étude ne peut être complète que si des expériences sont réalisées sur des matériaux argileux. Dans la bibliographie, on trouve très peu d'expériences réalisées sur de tels matériaux [3] et l'influence de la pression interstitielle n'a jamais été prise en compte.

La démarche adoptée consiste, à partir des résultats expérimentaux, à créer un modèle d'évolution de la célérité des ondes acoustiques pour des sédiments soumis aux variations de ces différents paramètres physiques.

## 2. Etude expérimentale et protocole d'essais.

L'étude concerne l'évolution de la propagation des ondes longitudinales à travers les sédiments soumis à différentes pressions effectives et interstitielles. Nous avons pour cela réalisé un ensemble de mesures « *in vitro* » (Fig. 1).

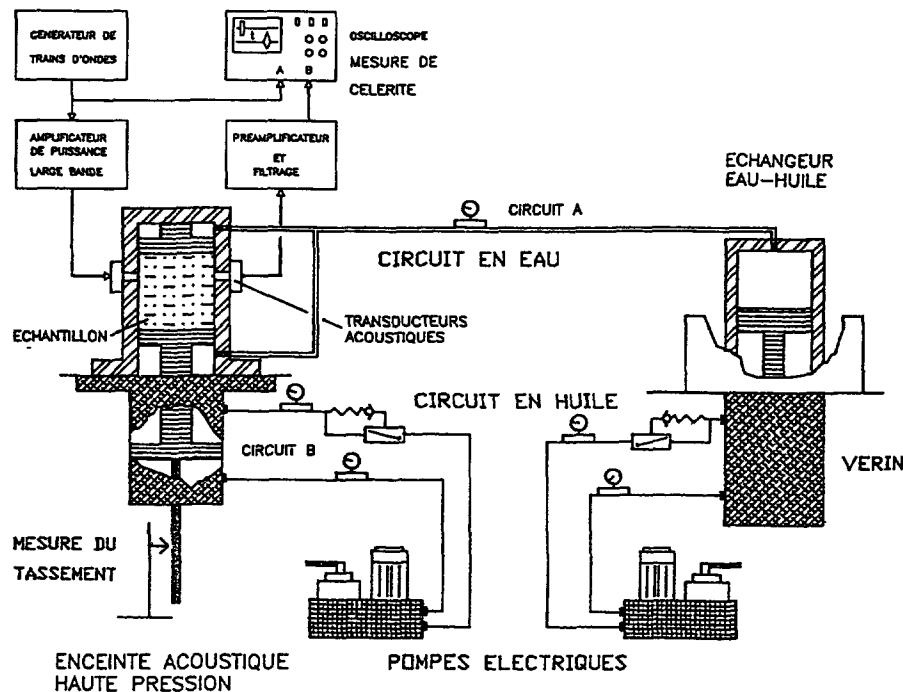


Fig. 1. — Montage expérimental.

[Experimental laboratory apparatus.]

**2.1 DESCRIPTION DU DISPOSITIF.** — L'appareillage utilisé se présente sous la forme d'une enceinte cylindrique (en acier inoxydable) de hauteur totale de 360 mm, percée à mi-hauteur de deux trous diamétralement opposés où sont logés les transducteurs à ultrasons.

La carotte est introduite dans l'enceinte le plus délicatement possible pour ne pas altérer ses propriétés physiques. La partie supérieure de l'échantillon est en contact avec le piston supérieur lors de la fermeture de l'enceinte. Le sédiment est mis en saturation pendant 48 h.

**2.1.1 Mise en pression.** — Deux circuits hydrauliques indépendants permettent la création de la pression interstitielle et de la pression effective. Des manomètres disposés le long des circuits hydrauliques indiquent l'évolution de ces pressions.

Deux expériences différentes sont réalisées :

a) *Variation de la pression effective* : cette pression est transmise au sédiment par l'intermédiaire d'un piston solidaire d'un vérin (circuit B). Un drain, évacuant le surplus d'eau, permet d'appliquer l'intégralité de cette pression au squelette solide. Des clapets anti-retour et des régulateurs de pression permettent une mise en pression régulière et constante.

Une tige en acier, solidaire du piston du vérin inférieur, permet à l'aide d'un comparateur, la mesure du tassemement. Connaissant la porosité et l'indice initial des vides, il est possible de déduire à chaque instant leurs nouvelles valeurs en fonction de la contrainte appliquée (principe de l'œdomètre). Si l'effet de frottement du piston inférieur sur la paroi de l'enceinte est négligé, la contrainte verticale appliquée est donnée par les manomètres.

b) *Variation de la pression interstitielle* : l'échangeur de pression transforme la pression d'huile en pression d'eau (circuit A), assurant ainsi une pression interstitielle au sein de l'éprouvette. La difficulté principale est de réaliser une mise en pression complète du matériau et de tout le circuit de drainage tout en restant à volume constant.

Cette expérience est très rapide pour les matériaux pulvérulents, car la pression en eau se transmet quasi-instantanément dans le sédiment saturé. Le volume sédimentaire doit rester constant pour ne pas mettre le sédiment en suspension ce qui entraînerait une modification des propriétés géotechniques.

**2.1.2 Ondes ultrasonores et mesure de la célérité.** — Le mode de propagation des ondes longitudinales se fait par transmission au travers de l'échantillon, car les faces actives des transducteurs sont en contact avec le matériau.

La fréquence de fonctionnement choisie ( $f_e = 280$  kHz) assure une longueur d'onde suffisamment grande devant les hétérogénéités du sédiment pour considérer ce dernier comme homogène. Ce qui, dans la théorie de Biot [4, 5], correspond à l'hypothèse basse fréquence (phénomène considéré comme non dispersif). D'autre part, à cette fréquence, et compte tenu des dimensions des faces actives, les transducteurs sont relativement directifs (demi-angle solide  $\approx 5^\circ$ ). Ceci permet de minimiser les trajets indirects induits par les parois de l'enceinte.

La célérité au travers de l'échantillon est déduite de la mesure du temps ( $t$ ) de transit du train d'ondes acoustiques à travers l'épaisseur ( $L = 85$  mm) connue de l'éprouvette.

Cette célérité est calculée par la relation :

$$C_L = \frac{L}{t - t_r}$$

où  $t_r$  est le temps de retard du système (14,40 µs) obtenu en mettant les faces actives du transducteur en contact.

**2.2 CARACTÉRISTIQUES DES SÉDIMENTS UTILISÉS.** — Trois sédiments, de nature différente, sont étudiés : un sable, une argile minéralogiquement pure (kaolinite) et des échantillons provenant de carottages effectués en Atlantique Nord-Est.

**2.2.1 Le sable.** — Prélevé sur la plage de Canet en Roussillon, c'est un sable unimodal de 280 µm de médiane granulométrique. Le Sorting Index ( $So$ ), déduit de la courbe de granulométrie ( $So = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$ ) correspond à la racine carrée du rapport entre le diamètre à 75 % et le diamètre à 25 % — s'apparente sensiblement à l'écart type de l'histogramme de fréquence

autour de la médiane granulométrique), est égal à 1,17 traduisant une granulométrie serrée et uniforme. Son poids spécifique est voisin de  $2,69 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ . Son indice de compressibilité  $C_c = 0,15$ , très petit indique un sédiment peu compressible ( $C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma}$  variation de l'indice de vide  $e = \frac{n}{1-n}$  où  $n$  est la porosité totale, rapportée à une variation de la contrainte) [5].

**2.2.2 La kaolinite.** — Notre choix s'est porté sur la kaolinite en raison de sa consolidation rapide ( $C_v$  coefficient de consolidation moyen de  $10^{-2} \text{ cm s}^{-1/2}$ ). Sa compressibilité ( $C_c$  moyen = 0,38) bien que forte pour un tel minéral argileux, est comparable à celle d'une argile naturelle. Dans la bibliographie, l'indice de compressibilité de la kaolinite est compris entre 0,10 et 0,25. L'homogénéité de ce matériau devrait permettre de mieux modéliser l'évolution de ses propriétés physiques en fonction de la contrainte exercée.

Les caractéristiques principales de la distribution granulométrique sont : une médiane granulométrique se situant autour de 1  $\mu\text{m}$ , une teneur en argile de 80 %, et un étalement de la courbe granulométrique traduit par  $So = 2,49$ . La teneur en eau et la masse volumique sont respectivement de 68 % et de  $1\ 840 \text{ kg/m}^3$ . L'indice des vides est de 1,7 ( $n = 37\%$  porosité connectée ou ouverte correspondant au volume des vides relié à l'extérieur).

**2.2.3 Sédiments naturels.** — Ils ont été prélevés dans l'Atlantique Nord-Est au large du Portugal, du Maroc et à proximité des Iles Canaries.

Les caractéristiques principales des tronçons étudiés sont les suivantes :

a) *Tango* : sur l'ensemble de la carotte, la teneur en carbonate de calcium est élevée (60 %). La teneur en eau avoisine les 97 % et le pourcentage en éléments inférieurs à 40  $\mu\text{m}$  atteint les 76 % ( $So = 7$ ). Le coefficient de compressibilité élevé (0,79) classe la carotte dans le domaine des argiles moyennes. L'indice des vides est égal à 2,51 engendrant une porosité ouverte de 72 %.

b) *Sierra* : dans la partie expérimentée de la carotte, la teneur en carbonate de calcium est de 30 %, identique à la teneur moyenne qui est de 35 %. Le pourcentage d'éléments inférieurs à 40  $\mu\text{m}$  est compris entre 92 et 96,5 % ( $So = 3,5$ ). L'indice des vides est de 1,87, impliquant une porosité ouverte de 65 %. L'indice de compressibilité ( $C_c = 0,455$ ) indique que notre sédiment est aussi une argile moyenne. La teneur en eau de cet échantillon est d'environ 68 %.

### 3. Résultats expérimentaux et exploitation.

**3.1 MATÉRIAU PULVÉRULENT-SABLE.** — L'étude de ce matériau permet de dégager des résultats généraux sur la propagation d'ondes ultrasonores dans un milieu pulvérulent [6]. Un tel milieu est constitué de particules solides qui ne possèdent aucune forme de liaison entre elles d'où une cohésion nulle, et un frottement interne relativement important. Les forces d'interaction qui existent dans un tel milieu sont des forces de contact ou de frottement.

Pour les expériences effectuées, le domaine de variation de la pression interstitielle ( $P$ ) est de 0 à 17 MPa et celui de la pression effective ( $\sigma$ ) de 0 à 10 MPa. La pression effective fait passer la porosité de 0,4 à 0,3 (Fig. 4).

**3.1.1 Loi de variation de la célérité en fonction des pressions interstitielles et effectives.** — Sur la figure 2 sont portés les résultats expérimentaux obtenus pour 6 pressions effectives. On constate que cette variation est quasi linéaire quelle que soit la valeur de la pression effective.

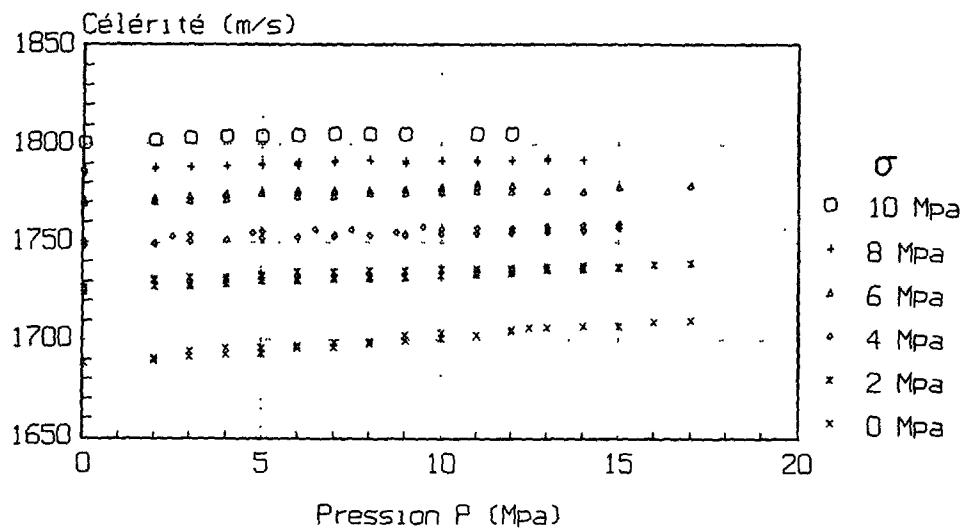


Fig. 2. — Célérité en fonction de la pression interstitielle pour différentes pressions effectives (sable).  
[Celerity as a function of interstitial pressure at different effective stresses (sand).]

La loi de variation de la célérité en fonction de la pression interstitielle pour une pression effective constante est de la forme :

$$C_L(P) = C_{L_0} + \alpha(\sigma)P \quad (1)$$

où :  $\alpha$  est la pente (en m/s par unité de pression) de la droite à  $\sigma = \text{constante}$ ,  
 $C_{L_0}$  est la célérité à  $P = 0$  MPa.

La figure 3 donne l'évolution de cette célérité en fonction de la pression réelle pour une pression interstitielle nulle. Cette loi peut s'écrire :

$$C_{L_0} = C_0 + \beta \cdot \sigma^n \quad (2)$$

avec :  $\beta = 25,45$  (en m/s par (unité de pression) $^n$ )

$$n = 0,63$$

$$C_0 = 1\,688 \text{ célérité à } P = 0 \text{ et } \sigma = 0 \text{ (en m/s).}$$

Au total, quand on connaît  $\alpha(\sigma)$ , la célérité pour un matériau pulvérulent vérifie la loi :

$$C_L(\sigma, P) = (C_0 + \beta \cdot \sigma^n) + \alpha(\sigma)P \quad (3)$$

avec :  $\alpha = 0,82 - 0,19 \log(\sigma)$  pour  $0,1 < \sigma < 10$  MPa,  $\alpha = 1,35$  pour  $\sigma = 0$  MPa.

**3.1.2 Discussion et comparaison avec la formulation de Biot.** — Le sable saturé peut rentrer dans le cadre de la théorie de Biot [4, 5] puisque les grains en contact forment un squelette solide.

Dans ce cadre, la modélisation complète de la célérité s'écrit sous la forme :

$$C_L = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( K_{ws} + K_f + \frac{4\mu}{3} \right)}$$

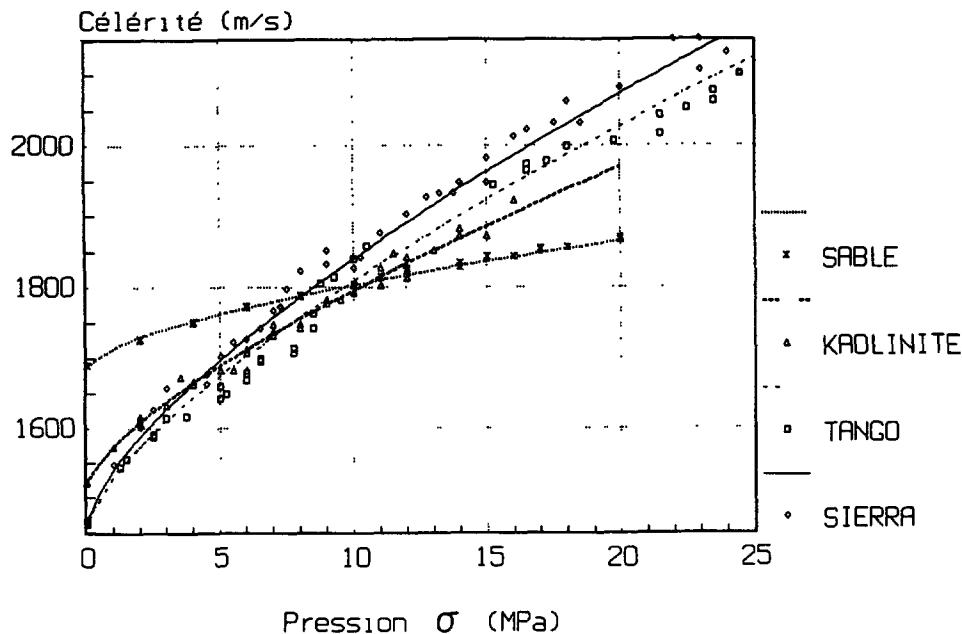


Fig. 3. — Célérité en fonction de la pression effective à  $P = 0$  (sable-kaolinite-Tango-Sierra).  
[Celerity versus effective stress at  $P = 0$  (sand-kaolinite-Tango-Sierra).]

où :  $\rho$  masse volumique du sédiment,  $\rho = n\rho_w + (1 - n)\rho_s$  avec  $n$  porosité,  $\rho_s$  et  $\rho_w$  respectivement masse volumique de la phase solide et de la phase liquide,  
 $K_{ws} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{n\beta_w + (1 - n)\beta_s}$  module d'incompressibilité pour une suspension de particules solides,  $\beta$ ,  $\beta_w$ ,  $\beta_s$  respectivement module de compressibilité du sédiment saturé, de la phase liquide et de la phase solide,  
 $K_f$  module d'incompressibilité de structure établi par Laughton [7],  
 $\mu$  module de rigidité.

Cette célérité croît avec le module d'incompressibilité du squelette ( $K_{ws}$ ) et avec le module de rigidité ( $\mu$ ). Il est évident que ces deux modules sont directement liés à l'évolution de la pression effective. Quand cette pression augmente on assiste à un durcissement du squelette (glissement relatif des particules et serrage des grains les uns sur les autres avec rupture éventuelle de certaines particules). De même la diminution de la porosité due à l'augmentation de la pression effective (Fig. 4) l'influence directement le module d'incompressibilité ( $K_{ws}$ ). Ces essais confirment et vont dans le même sens que la théorie de Biot. La figure 5, déduite des expériences précédentes, montre la relation simple et connue entre célérité et porosité. En effet quand la porosité tend vers 1 (présence de liquide seul), on tend vers la célérité de l'eau. Inversement quand cette porosité tend vers zéro, on tend vers la célérité du matériau qui est supérieure à celle de l'eau.

**3.2 MATÉRIAUX ARGILEUX.** — Ces expériences sont effectuées avec un protocole d'essais différent de celui des sables. La nature de ces sédiments ne permet pas une mise en pression quasi immédiate, aussi bien pour la pression interstitielle que pour la pression effective.

Pendant la consolidation, il est nécessaire de maintenir sur le piston une charge constante et cela pendant plusieurs heures voire plusieurs jours. En effet, la consolidation s'effectue en

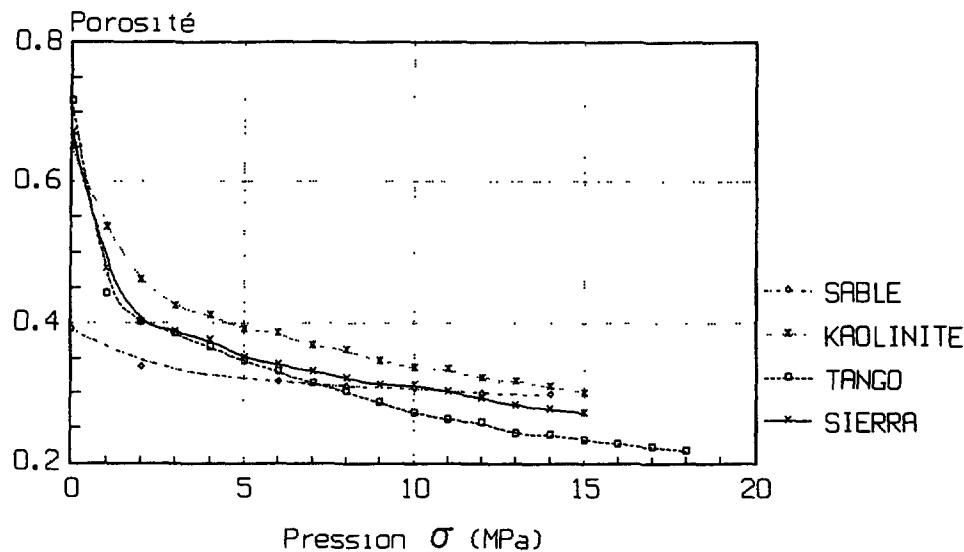


Fig. 4. — Porosité en fonction de la pression effective (sable-kaolinite-Tango-Sierra).

[Porosity versus effective stress (sand-kaolinite-Tango-Sierra).]

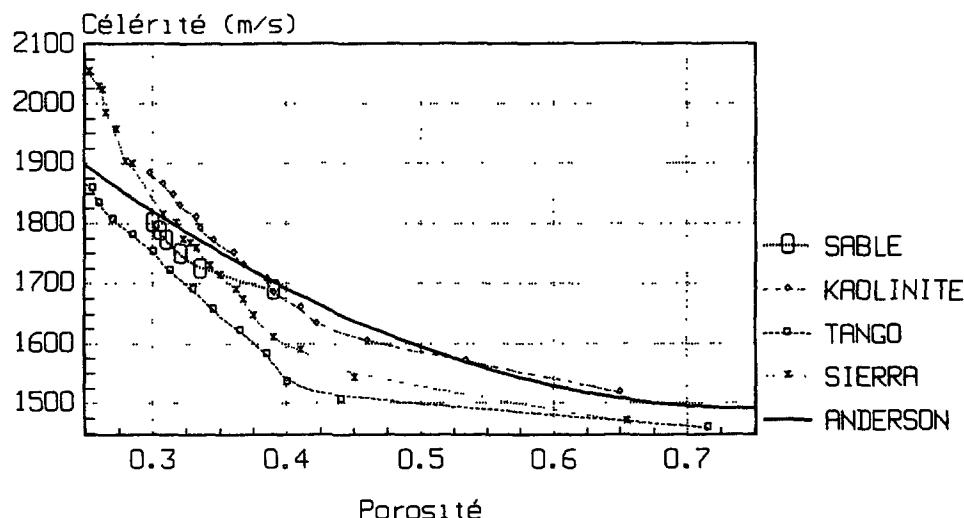


Fig. 5. — Evolution de la célérité en fonction de la porosité (sable) et comparaison des résultats (kaolinite-Tango-Sierra) avec Anderson [8].

[Celerity versus porosity (sand) and comparison of results (kaolinite-Tango-Sierra) with Anderson [8].]

deux phases, la première dissipe la surpression interstitielle, la seconde évacue l'eau et réarrange les particules. D'une manière générale et contrairement au matériau pulvérulent, la seconde phase est assez longue. Le temps d'établissement de cette phase, raisonnable pour la kaolinite, devient important pour les deux argiles silteuses (Tango et Sierra). Pour ces deux dernières, ce temps de tassement a été fixé arbitrairement. Pour la kaolinite, plusieurs

échantillons de même hauteur sont manipulés. Les autres argiles ne sont testées qu'une seule fois du fait de leur caractère unique.

**3.2.1 Kaolinite.** — Les figures 3 et 6 donnent respectivement l'évolution expérimentale de la célérité en fonction de la pression effective ( $\sigma$  compris entre 0 et 17 MPa) pour  $P = 0$  et l'évolution de cette même célérité en fonction de la pression interstitielle ( $P$ ) pour une contrainte de 0 et 2 MPa.

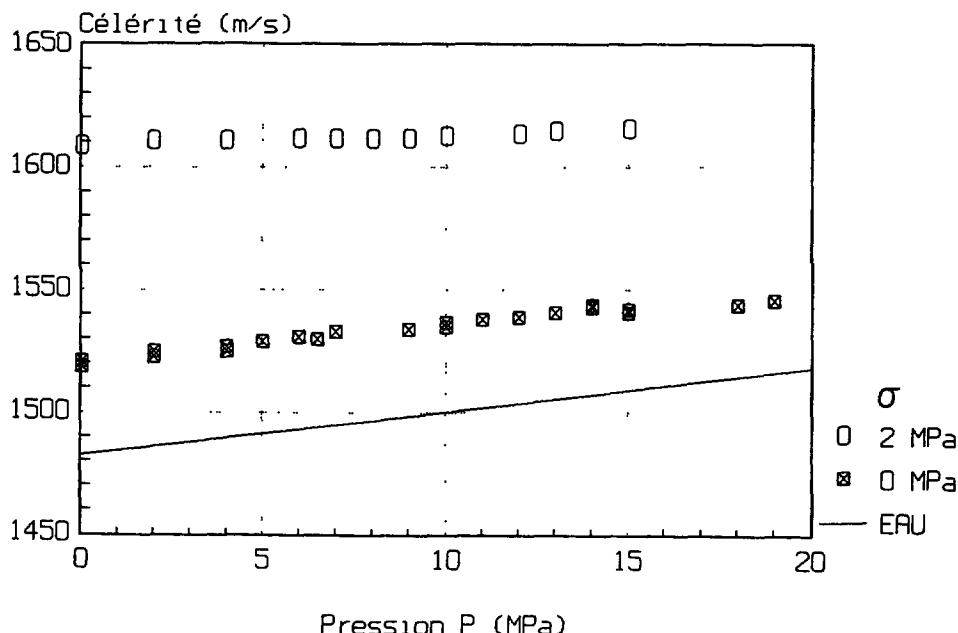


Fig. 6. — Célérité en fonction de la pression interstitielle (kaolinite et eau).

[Celerity versus interstitial pressure (kaolinite and water).]

Le dépouillement mathématique de ces résultats donne la même tendance que pour les matériaux pulvérulents. La loi de variation de la célérité en fonction de  $\sigma$  et  $P$  est analogue. Les constantes ont pour valeurs :

$$C_0 = 1\ 518, \quad \beta = 53,46, \quad n = 0,71.$$

Pour la pente  $\alpha$  ( $\sigma$ ) il semble qu'après 2 MPa il n'y ait plus de variation sensible et l'on peut considérer que dans ce domaine  $\alpha$  varie linéairement en fonction de  $\sigma$  ( $\alpha = 1,59$  pour 0 MPa,  $\alpha = 0,29$  pour 2 MPa).

La figure 4 montre la porosité en fonction de  $\sigma$ . La confrontation de l'évolution expérimentale de la célérité en fonction de la porosité (Fig. 5), avec celle formulée par Anderson [8] après étude de différents échantillons provenant de plusieurs océans, est satisfaisante.

**3.2.2 Sédiments naturels.** — Les essais sur Tango et Sierra n'ont pu être réalisés qu'à  $\sigma = 0$ . Les résultats ne sont pas exploitables dès que l'on applique une contrainte.

La loi de variation de la célérité en fonction de la pression interstitielle est encore analogue à celles trouvées pour le sable et la kaolinite (Figs. 3-7).

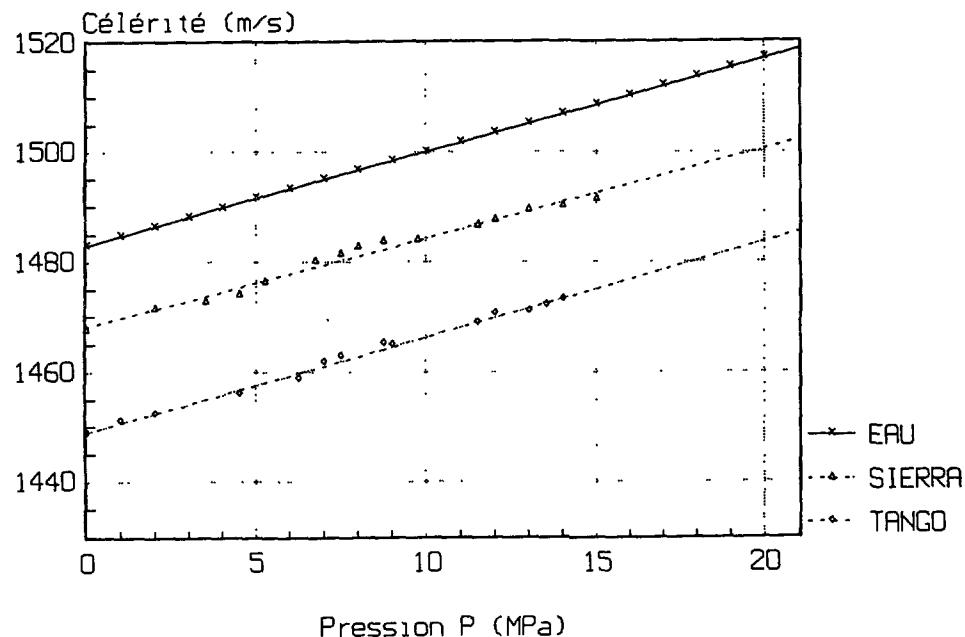


Fig. 7. — Evolution de la célérité en fonction de la pression interstitielle à  $P = 0$  (sédiment Tango, Sierra et eau).

[Celerity versus interstitial pressure at  $P = 0$  (sediment Tango, Sierra and water).]

Par contre l'évolution de la célérité en fonction de la porosité ne coïncide plus avec celle prédicta par la formulation de Anderson (Fig. 5). Cette divergence peut s'expliquer par la teneur relativement élevée en carbonate de calcium dans ces carottes. De plus pour de fortes pressions et à porosité inférieure à 40 %, les sédiments sont solidifiés et réagissent comme un solide. L'approche de Anderson n'est donc plus applicable.

#### 4. Conclusion.

L'analyse de l'influence de la pression interstitielle et de la pression effective sur la propagation d'ondes ultrasonores longitudinales au travers de sédiments marins semble aboutir au même résultat. La célérité de ces ondes de compression a une loi de variation qui paraît universelle, en tous cas applicable aux matériaux pulvérulents du type sable et aux matériaux argileux.

Cette loi donnée en (3) relativement simple fait intervenir les constantes suivantes, fonctions du matériau :

sable	$\beta = 25,5$	$n = 0,63$	$C_0 = 1\,688$
kaolinite	$\beta = 53,46$	$n = 0,71$	$C_0 = 1\,518$
Tango	$\beta = 70,5$	$n = 0,70$	$C_0 = 1\,448$
Sierra	$\beta = 74,5$	$n = 0,69$	$C_0 = 1\,465$

Les valeurs de  $C_0$  sont celles des célérités obtenues à  $P = 0$  et  $\sigma = 0$ . Pour les argiles, la valeur de  $n$  est constante de l'ordre de 0,7 et  $\beta$  semble dépendre de la teneur en carbonate de calcium (différence notable entre la kaolinite et les sédiments prélevés en Atlantique Nord Est).

La pente  $\alpha$ , quant à elle, suit de toute évidence l'évolution de la porosité en fonction de la pression effective. Cette évolution est très rapide pour les argiles.

Cette étude encore partielle mérite d'être complétée en testant d'autres échantillons argileux ou sableux de granulométrie différente. En outre, il est souhaitable que le paramètre température soit pris en compte ainsi que la perméabilité de l'échantillon.

### Bibliographie

- [1] PATOT J. J., DAUPLEIX J. M., LONGUEMAR J. P., Variation de la célérité des ondes ultrasonores de compression avec la contrainte effective et la pression interstitielle dans un sédiment saturé, *J. Acoust.* 4 (1991) 139, 157.
- [2] PATOT J. J., Evaluation de la célérité des ondes acoustiques dans les sédiments marins soumis à différentes pressions effectives et interstitielles, Thèse de doctorat de l'Université de Perpignan (1990).
- [3] NAUROY J. F., Etude de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans les sédiments argilo-vaseux à différents stades de leur compaction, Thèse Docteur Ingénieur, Paris VI (1975).
- [4] BIOT M., General solutions for the equation of elasticity and consolidation for a porous material, *J. Appl. Mech.* (1956) 91-96.
- [5] BOURBIE T., COUSSY O., ZINSZNER B., Acoustique des milieux poreux, Publications de l'Institut Français du Pétrole (Technip Eds., 1986).
- [6] STOLL R. D., Theoretical aspects of sound transmission in marine sediments, *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (5) (1980) 1341-1350.
- [7] LAUGHTON A. S., Sound propagation in a compacted ocean sediments, *Geophysics* 22 (1957) 233-260.
- [8] ANDERSON R. S., Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediment, *Physics of Sound in Marine Sediments* Marine Science 1 (Plenum Press, New York and London, 1974) pp. 481-518.