

PROPRIETES ELASTIQUES D'UNE ARGILE SOUS CHARGEMENT TRIAXIAL - MESURE PAR PROPAGATION D'ONDES ULTRASONS

ULTRASONIC IDENTIFICATION OF ELASTIC PROPERTIES OF A REMOLDED CLAY ON COMPLEX TRIAXIAL PATHS

Lamine IGHIL AMEUR¹, Guillaume ROBIN¹, Mahdia HATTAB¹

¹ *Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux, Metz, France*

RÉSUMÉ – L'objectif de cette étude est de caractériser l'évolution des propriétés élastiques d'une argile qui s'endommage sous chargement triaxial. Le chargement, suivant différents chemins de contrainte, est réalisé sur des éprouvettes de kaolin K13 saturées. La caractérisation expérimentale est réalisée par propagations ultrasons. Les résultats montrent que la vitesse d'onde de compression est liée au phénomène de dilatance, et dépend du niveau de contrainte et non du chemin de chargement.

ABSTRACT – The aim of this research is to characterize the variation of elastic properties of damaged clay under triaxial loading. Triaxial loading was performed on saturated kaolin K13 specimens following different stress paths and stress levels. Test results show that P-wave velocity is related to the phenomenon of dilatancy, and depends on the stress level and not on the loading path.

1. Introduction

L'endommagement progressif du sol affecte ses propriétés élastiques, celles-ci peuvent être approchées par différentes méthodes de mesure dont la méthode par propagation d'ondes ultrasonores, qui consiste à mesurer des vitesses d'ondes sensibles aux propriétés élastiques du matériau (Hall et al., 2007; Fjaer et al., 2008).

Les essais mécaniques, réalisés au laboratoire sur des sables et des argiles, permettent d'associer au pic de contrainte, observé dans le comportement mécanique, une concentration de la déformation dans les bandes de cisaillement (Bésuelle et al., 2000). Ces observations expérimentales mettent en évidence le phénomène de rupture dans les sols.

Lors d'un essai triaxial sur un échantillon d'argile, le phénomène d'endommagement peut se produire avant le pic (Desrues and Andò, 2015). Dans le cas des argiles remaniées et reconsolidées au laboratoire, l'endommagement peut apparaître lors du chargement triaxial sous forme de micro-fissures. Cette microfissuration a été observée à l'échelle microscopique par Hattab et Fleureau (2010), elle se présente localement sous forme de plans orientés sur lesquels viennent s'arranger face contre face des particules d'argile. Ce qui constitue des points locaux de faiblesse (Hattab, 2011) d'où peut s'amorcer le plan de glissement qui se propage jusqu'à l'échelle de l'éprouvette. Les propriétés élastiques du matériau, notamment à la rupture, sont susceptibles d'être considérablement dégradées (Gaombalet, 2004).

On se propose dans cette étude d'analyser l'évolution des propriétés élastiques d'une éprouvette d'argile sur chemins triaxiaux et en particuliers à l'état ultime. L'argile est un kaolin k13, saturée, remaniée, reconstituée au laboratoire. Un système d'investigation expérimental a été développé permettant de mesurer la vitesse d'ondes de compression qui se propage dans le matériau.

L'approche expérimentale consiste dans un premier temps à réaliser sur des éprouvettes d'argile normalement consolidées ou surconsolidées, différents chemins triaxiaux drainés à $\sigma'_3 = \text{constante}$ et à $p' = \text{constante}$. Des échantillons, provenant d'éprouvettes ainsi sollicitées, sont ensuite récupérés pour les mesures par ultrasons. Les essais ultrasonores sont réalisés après déchargement mécanique de l'éprouvette.

2. Propriétés du matériau utilisé et essai triaxial

2.1. Propriétés du kaolin K13

Le matériau étudié est une kaolinite commercialisée sous le nom de Kaolin K13. Ses propriétés ont été, entre autres, caractérisées par Hammad (2010). Des essais au granulomètre laser ont mis en évidence que près de 83% de particules était de taille inférieure à $2 \mu\text{m}$, et environ 30% de taille inférieure à $1 \mu\text{m}$. Les limites de plasticité et de liquidité sont respectivement de 20% et 40%. La densité des grains solides est égale à 2,65.

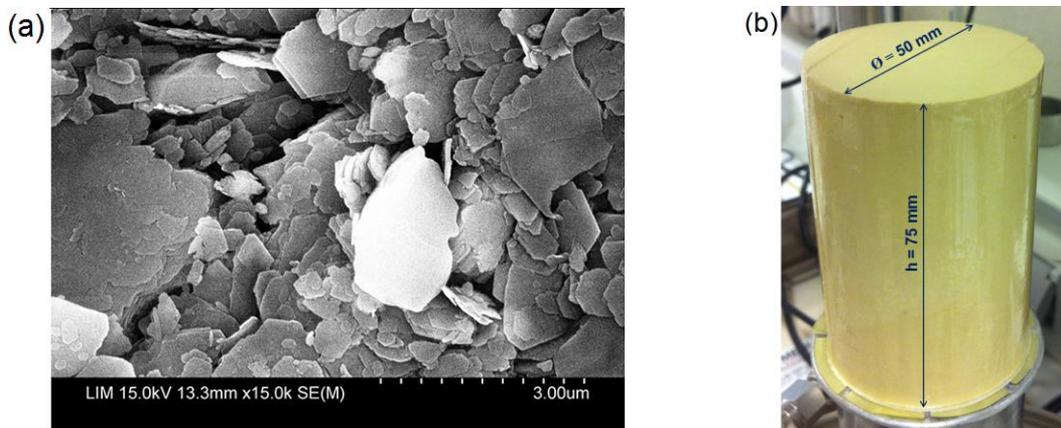


Figure 1. Matériau utilisé : (a) Photographie au MEB des particules du kaolin P300 (Hattab et al., 2015), (b) Eprouvette découpée.

Les observations au MEB de ces particules montrent des plaquettes rigides hexagonales constituées d'un ensemble de feuillets superposés (Fig. 1 (a)).

Les éprouvette cylindriques (Fig. 1 (b)) sont confectionnés à partir d'une boue préconsolidée à une contrainte verticale effective $\sigma'_v = 120 \text{ kPa}$. La boue (argile poudre + eau désaérée) est réalisée avec une teneur en eau initiale égale à 1,5 fois la limite de liquidité ($w_0 = 1,5w_L$).

2.2. Chemins triaxiaux et découpes des échantillons

Les chemins triaxiaux sont réalisés en normalement consolidés et surconsolidés, dans les conditions drainées, avec différents chemins de contrainte (à σ'_3 constante et purement déviatorique à p' constante). Deux types d'essais ont été réalisés, le premier consiste à conduire le chargement jusqu'à l'état critique, le second, consiste à réaliser différents chemins pour atteindre un même niveau de contrainte. Ce niveau de contrainte est désigné par le point P2, dont les coordonnées sur le plan des contraintes sont $(q, p') = (160, 300) \text{ kPa}$.

Le tableau 1 présente, i) les caractéristiques des chemins normalement consolidés, p'_{ic} étant la contrainte de consolidation, ii) Les essais surconsolidés caractérisés d'une part par la contrainte de consolidation p'_1 , et le degré de surconsolidation OCR.

e_{00} et e_f sont respectivement l'indice des vides initial et l'indice des vides et final (obtenu après le déchargement isotrope).

Tableau 1. Caractéristiques des essais triaxiaux

Type d'essai	Chemins triaxiaux normalement consolidés (NC)				Chemins triaxiaux surconsolidés (OC)				
	Noms	p'_{ic} (kPa)	e_{00}	e_f	Noms	p'_1 (kPa)	OCR	e_{00}	e_f
$\sigma'_3 = \text{cste}$	NC-sig200	200	0.942	0.773	OC-sig200	200	5	0.857	0.704
	NC-sig250	250	0.961	0.550	OC-sig250	250	4	0.918	0.707
	NC-sig250 _{P2}	250	0.921	0.771	OC-sig250 _{P2}	250	4	0.809	0.605
	NC-sig290	290	0.966	0.736	-	-	-	-	-
$p' = \text{cste}$	NC-p200	200	0.959	0.808	-	-	-	-	-
	NC-p250	250	0.959	0.785	OC-p250	250	4	0.918	0.704
	NC-p300	300	0.930	0.745	OC-p300	300	3.33	0.965	0.743
	NC-p300 _{P2}	300	0.893	0.744	OC-p300 _{P2}	300	3.33	0.966	0.738

A la fin du chargement triaxial, l'éprouvette testée est extraite de la cellule après le déchargement tel que présenté sur la figure 2(a) dans le plan contrainte-déformation ($q - \varepsilon_1$).

Des échantillons, de 20 mm d'épaisseur, sont découpés à partir de l'éprouvette suivant deux plans, le plan vertical, parallèle à la contrainte axiale σ'_1 , et le plan horizontal, perpendiculaire à la contrainte axiale (Fig. 2 (b)). Le sens de la mesure US est représenté sur la figure 2, pour chaque type d'échantillon (H ou V)

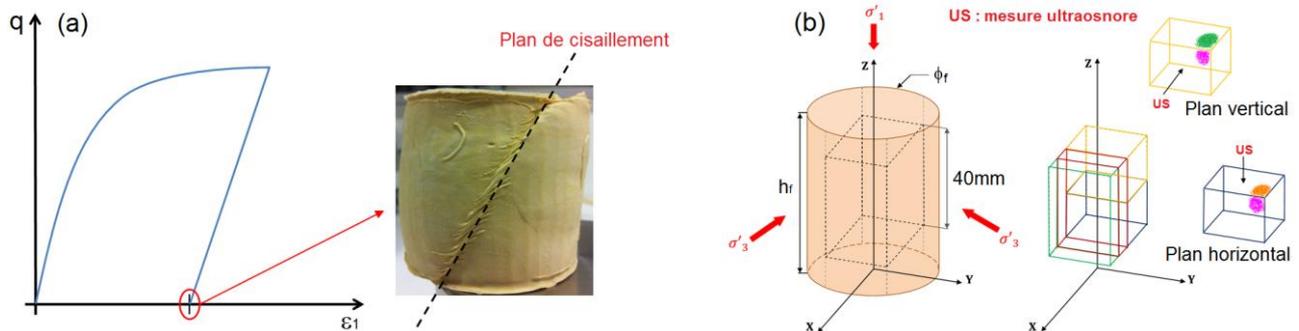


Figure 2. Mesure ultrasonore à la fin du chargement triaxial : (a) état final de l'éprouvette, (b) découpe des échantillons.

3. Mesure ultrasonore

3.1. Principe de la méthode d'insertion-substitution

Pour réaliser les mesures ultrasonores, nous avons adopté la méthode d'insertion-substitution dans un dispositif expérimental développé au laboratoire. Le schéma de principe de cette méthode, représenté sur la figure 3, permet de déterminer la vitesse d'onde de compression V_p .

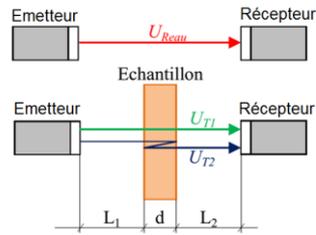


Figure 3. Schéma de principe de la mesure ultrasonore par la méthode d'insertion-substitution.

Avant de réaliser la mesure de temps de vol sur les échantillons d'argile, une mesure de référence dans l'eau a été effectuée et caractérisée par la propagation U_{eau} . Les propagations de l'onde reçues à travers l'échantillon argileux sont notées U_{T1} et U_{T2} . (Fortineau, 2006; Ighil Ameer et al., 2015).

Le rapport entre l'impulsion transmise à travers l'échantillon U_{T1} sur l'impulsion de référence U_{eau} permet de déterminer la vitesse de phase V_p exprimée dans (1).

$$V_p = \frac{1}{\frac{1}{V_{\text{eau}}} - \frac{\Delta\phi}{\omega \cdot d}} \quad (1)$$

V_{eau} est la vitesse de référence calculée sur la distance séparant les deux transducteurs (L_1+d+L_2). "d" est l'épaisseur de l'échantillon choisie. " ω " est la pulsation d'onde elle est fonction de la fréquence choisie. $\Delta\phi$ est le phasage entre U_{T1} et U_{eau} .

3.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est schématisé sur la figure 4. Il est composé d'un couple de transducteurs (émetteur-récepteur) ayant un diamètre actif de 15 mm et une fréquence de sollicitation de 1 MHz. La distance séparant les deux transducteurs est égale à 10 cm. Un générateur de fonction arbitraire sollicite le transducteur émetteur, ce qui permet la génération puis la propagation d'une onde ultrasonore à travers le milieu (couplant puis échantillon) pour atteindre la surface du transducteur récepteur. L'acquisition du signal est ensuite effectuée à l'aide d'un oscilloscope relié à un ordinateur pour le traitement de l'onde acoustique reçue.

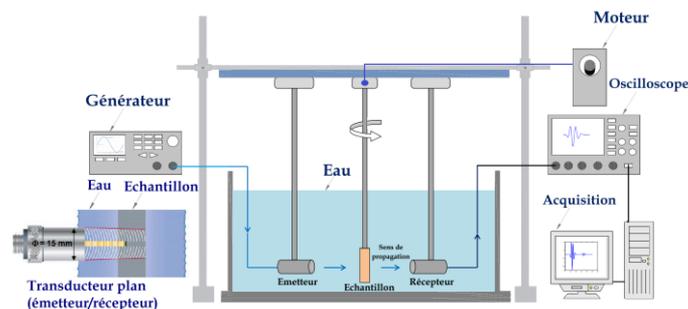


Figure 4. Dispositif expérimental de mesure de la vitesse d'onde de compression.

Afin de préserver l'état de saturation de l'échantillon d'argile, conservée à la fin du chargement triaxial, celui-ci est protégé par une membrane étanche en latex de quelques microns d'épaisseur. Cette membrane a été testée, on a montré qu'elle est acoustiquement transparente.

4. Résultats et discussion

4.1. Etat critique

Le concept d'état critique a été établi par Roscoe et al. (1958), c'est un état ultime observé expérimentalement et mis en évidence par de nombreux travaux tels que ceux réalisés par Biarez et Hicher (1994).

La figure 5 montre les projections M et CSL de l'état critique du kaolin K13, respectivement sur les plans (q, p') et $(e, \log p')$. L'état critique est identifié sur chemins normalement consolidés.

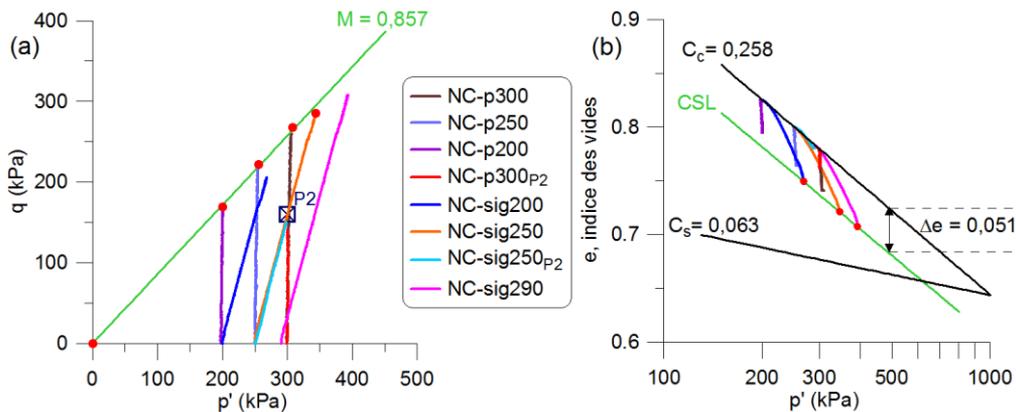


Figure 5. Représentation de l'état critique sur : (a) le plan $[q - p']$, (b) le plan $[e - \log p']$.

Sur la figure 5 (a), le point P2 représente le niveau de contrainte atteint par quatre chemins différents, en normalement consolidé et en surconsolidé. L'argile ainsi sollicitée fera l'objet d'une analyse des propriétés élastiques. On peut noter que P2 se situe suffisamment en dessous de la droite M d'état critique.

4.2. Evolution des propriétés élastiques en fonction du chemin de contrainte

4.2.1. Vitesse d'onde de compression

La figure 6 présente les variations de la vitesse d'onde mesurée suivant les chemins triaxiaux à $\sigma'_3 = \text{constante}$ et à $p' = \text{constante}$, normalement consolidés et surconsolidés, à l'état critique et au point P2.

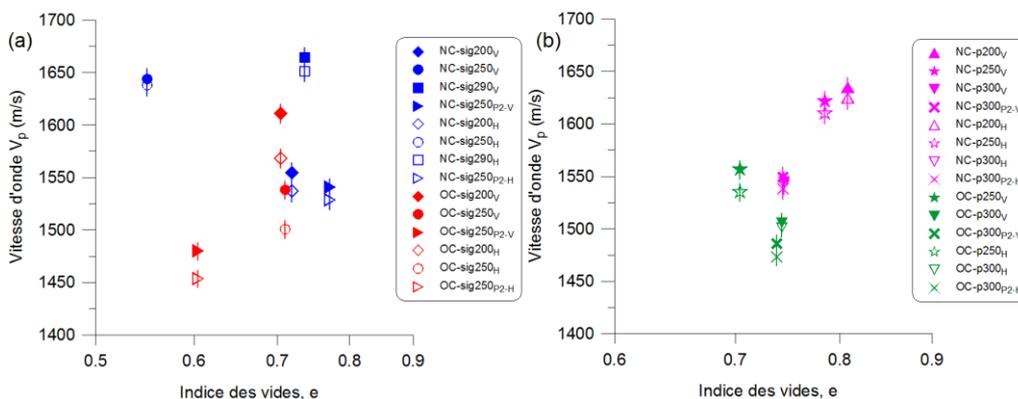


Figure 6. Vitesse d'onde de compression sur chemins à (a) $\sigma'_3 = \text{cste}$ et (b) $p' = \text{cste}$ en fonction de l'indice des vides final.

Les résultats montrent que le comportement normalement consolidé, en contractance ($\varepsilon_v > 0$), est caractérisé par des vitesses plus élevées par rapport à celles associées au comportement surconsolidé dont le comportement est pour la plupart dilatant ($\varepsilon_v < 0$). Par ailleurs, les vitesses suivant le plan vertical (V) sont légèrement supérieures à celles enregistrées suivant le plan horizontal (H). Ce qui met en évidence une faible anisotropie élastique induite par le chargement triaxial.

4.2.2. Module élastique dynamique

Le module élastique dynamique E_{dyn} est calculé à partir de la vitesse d'onde de compression V_p suivant la formule de l'équation (2) :

$$E_{dyn} = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho V_p^2 \quad (2)$$

Où ρ est la masse volumique de l'échantillon. ν est le coefficient de Poisson, que nous avons estimé pour chaque chemin triaxial à la fin du chargement. Pour cela la déformation volumique ($\Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_1 + 2\Delta\varepsilon_3$) a été estimée à partir de la déformation volumique obtenue après déchargement de l'éprouvette. En estimant la déformation axiale correspondante à ce déchargement ($\Delta\varepsilon_1$), le coefficient de Poisson est obtenu par le rapport ($\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1$). Les valeurs de ν obtenues sur l'ensemble des chemins triaxiaux varient entre 0,243 et 0,410.

Les modules élastiques dynamiques, obtenus sur les chemins triaxiaux étudiés, sont reportés sur la figure 7 en fonction de l'indice des vides final.

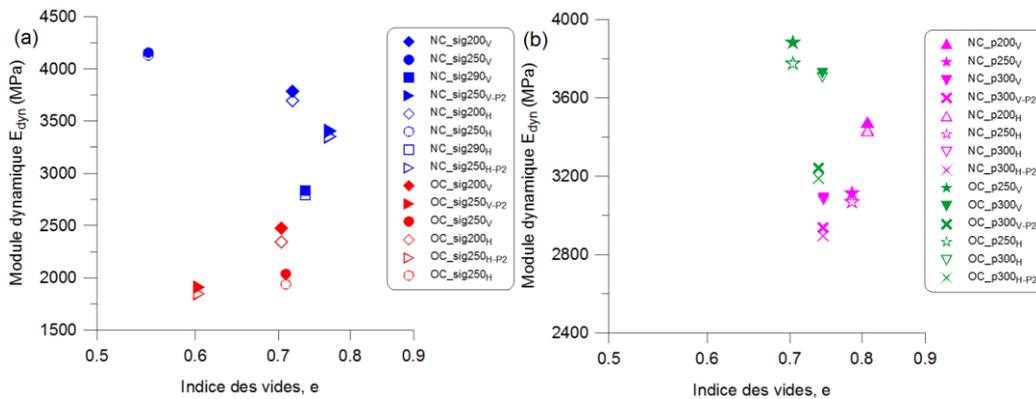


Figure 7. Module élastique dynamique sur chemins à (a) $\sigma'_3=cste$ et (b) $p'=cste$ en fonction de l'indice des vides final.

A $\sigma'_3=cste$ (Fig. 7 (a)) les valeurs obtenues dans le comportement normalement consolidé (2700 - 4200 MPa) sont globalement supérieures à celles calculées dans le comportement surconsolidé (1800 - 2500 MPa). Toutefois le résultat de l'essai NC-sig290_{V&H} (où $\nu = 0,383$) met en évidence la sensibilité dans le calcul du module élastique dynamique par rapport au coefficient de Poisson (estimé). A $p'=cste$ (Fig. 7 (b)), les valeurs du module élastique sont comprises entre 2400 et 4000 MPa et c'est le comportement surconsolidé qui induit les valeurs les plus élevées.

4.3. Influence du chemin de contrainte

Pour analyser l'influence du chemin de contrainte, nous allons nous focaliser sur les mesures de vitesse des ondes effectuées au niveau de contrainte représenté par P2 sur

la figure 5 (a). Les propriétés élastiques obtenues en ce point par les quatre chemins NC-p300_{P2}, NC-sig250_{P2}, OC-p300_{P2} et OC-sig250_{P2}, sont présentées sur la figure 8.

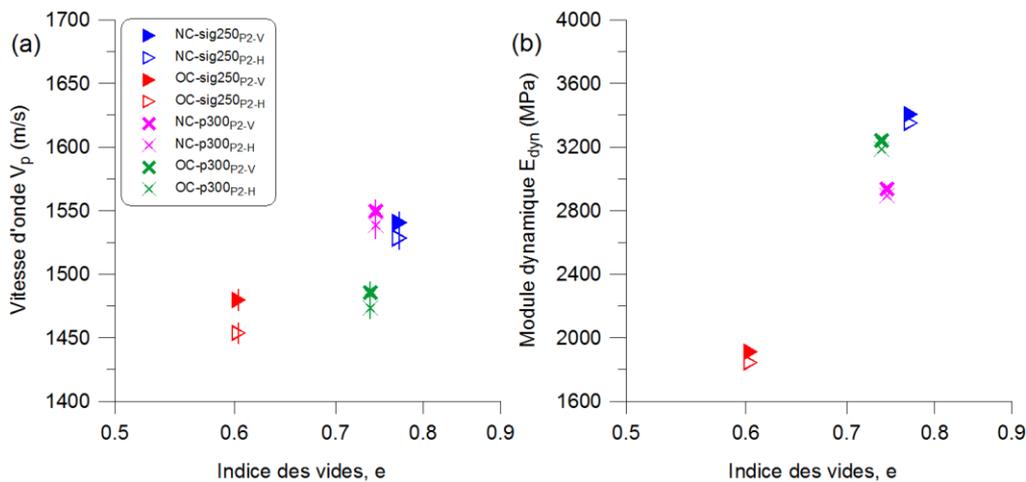


Figure 8. Propriétés élastiques du point P2 : (a) vitesse d'onde et (b) module élastique dynamique en fonction de l'indice des vides final.

Sur chemins normalement consolidés la vitesse moyenne obtenue est de $1545 \pm 4,4$ m/s pour les essais NC-sig250_{P2} et NC-p300_{P2} (Fig. 8 (a)). D'autre part, les chemins surconsolidés mettent en évidence une vitesse moyenne de $1483 \pm 2,9$ m/s pour les essais OC-sig250_{P2} et OC-p300_{P2}. L'écart entre ces deux valeurs moyennes (62m/s) montre que la surconsolidation affecte la vitesse d'onde qui devient plus faible comparé au cas normalement consolidé.

Les modules élastiques dynamiques calculés à partir de ces vitesses sont reportés sur la figure 8 (b) en fonction de l'indice des vides final. Les résultats montrent des valeurs très proches excepté le cas de l'essai OC-sig250_{P2} qui enregistre le coefficient de Poisson le plus élevé ($\nu = 0,410$).

5. Conclusions

Une identification expérimentale des propriétés élastiques à partir de la propagation des ondes ultrasonores a été réalisée sur une argile saturée remaniée et reconstituée au laboratoire. L'approche expérimentale consiste, dans un premier temps, à effectuer sur des éprouvettes cylindriques plusieurs chemins triaxiaux normalement consolidés et surconsolidés à σ'_3 constante et sur chemins purement déviatoriques. Les mesures acoustiques ont été menées, par la méthode d'insertion-substitution, sur deux directions différentes dans des échantillons d'argile après déchargement et extraction de la cellule triaxiale.

Sur chemins normalement consolidés, nous avons identifié l'état critique sur le plan des contraintes ($q - p'$) et sur le plan ($e - \log p'$). Les propriétés élastiques d'un matériau argileux sous chargement triaxial ont pu être déterminées à partir de la mesure de la vitesse d'onde de compression. Les résultats nous ont montré que les mécanismes de déformation, selon que le matériau soit de type contractant ou dilatant, influençaient les propriétés élastiques. Sur chemin normalement consolidé, la vitesse d'onde obtenue sur un chemin à σ'_3 constante est supérieure à celle mesurée sur un chemin purement déviatorique. Sur chemin surconsolidé, les valeurs de vitesse d'onde sont plus réduites, quelque soit le chemin suivi. Le module élastique dynamique a été déduit à partir des

mesures de vitesse d'onde. Son évolution dépend notamment de l'estimation du coefficient de Poisson à partir des résultats expérimentaux des essais triaxiaux.

Enfin, à un même niveau de contrainte (point P2), nous avons conduit différents chemins triaxiaux. Les résultats ont montré que le chemin de contrainte a une faible influence sur la vitesse d'onde mesurée en ce point pour l'ensemble des chemins.

6. Références bibliographiques

- Bésuelle P., Desrues J., Raynauld S. (2000). Experimental characterisation of the localisation phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* **37**: 1223-1237.
- Biarez J., Hicher P.Y. (1994). Elementary Mechanics of soils behavior, Saturated remoulded soils, Balkema, Rotterdam-Brookfield.
- Desrues J., Andò E. (2015). Strain localisation in granular media. *C. R. Physique* **16(1)**: 26-36.
- Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raen A.M., Risnes R. (2008). *Petroleum Related Rock Mechanics*, 2nd Edition, Elsevier.
- Fortineau J. (2006). Méthodes ultrasonores linéaires et non linéaires appliquées à l'étude de la reprise hydrique dans les polymères et composites, Thèse de doctorat, Université de Tours, France.
- Gaombalet J. (2004). Modélisation du gonflement des argiles et de ses effets sur les ouvrages de stockage souterrain, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, France.
- Hall S.A., Viggiani G., Charalampidou E., Bésuelle P., Rousseau C. (2007). Caractérisation de l'endommagement localisé dans les géomatériaux à l'aide des ondes ultrasonores en conditions de laboratoire. 18^{ème} Congrès français de mécanique, 27-31 août, Grenoble, France.
- Hammad T. (2010). Comportement des sédiments marins de grande profondeur: approche multiéchelle, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France.
- Hattab M., Fleureau J.M. (2010). Experimental study of kaolin particle orientation mechanism. *Geotechnique* **60(5)**: 323-331.
- Hattab M. (2011). Critical state notion and microstructural considerations in clays. *C. R. Mécanique* **339**: 719-726.
- Hattab M., Hammad T., Fleureau J.M. (2015). Internal friction angle variation in a kaolin/montmorillonite clay mix and microstructural identification. *Geotechnique* **65(1)**: 1-11.
- Ighil Ameer I., Robin G., Hattab M. (2015). Elastic properties in a clayey material under mechanical loading - an estimation through ultrasonic propagations, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **20**, DOI: 10.1080/19648189.2015.1090926
- Roscoe K.H., Schofield A.N., Wroth C.P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique* **8(1)**: 22-53.