

PROPRIETES POROELASTIQUES ISOTROPES TRANVERSES DE L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN

TRANVERSE ISOTROPIC POROELASTIC PROPERTIES OF THE CALLOVO-OXFORDIAN CLAYSTONE

Malik BELMOKHTAR¹, Siavash GHABEZLOO¹, Pierre DELAGE¹, Nathalie CONIL²

¹ Laboratoire Navier/CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France

² Andra, Bure

RÉSUMÉ – On présente une détermination détaillée des paramètres poroélastiques de l'argilite du Callovo-Oxfordien conduite à l'aide d'une cellule de compression isotrope avec un suivi précis des déformations, à partir d'essais de compression drainés, non-drainés et sans membrane. Du fait de la faible perméabilité de l'argilite, un taux de chargement de 0,5 kPa/min est adopté pour les essais drainés. Les résultats des divers essais présentent une bonne compatibilité, et on déduit également des résultats les coefficients de Biot isotropes transverses b_1 (perpendiculaire au litage) et b_2 (parallèle au litage), ainsi que le module de compression sans membrane $K_s = 21,7$ GPa.

ABSTRACT – A careful determination of the poroelastic parameters of the Callovo-Oxfordian (COx) claystone was conducted in an isotropic compression cell, with careful strain measurements through drained, undrained and unjacketed compression tests carried out on fully saturated specimens. Small loading rates were used to ensure full drainage conditions in drained tests (0,5 kPa/min). The data obtained from different tests are fairly comparable. One also determined the transverse isotropic poroelastic Biot's effective stress coefficients b_1 (perpendicular to bedding) and b_2 (parallel to bedding). An unjacketed modulus $K_s = 21.7$ GPa was also determined.

1. Introduction

L'argilite du Callovo-Oxfordien (COx) est une roche argileuse de faible perméabilité (de l'ordre de 10^{-20} m²) composée, au niveau du laboratoire souterrain de l'Andra à Bure à 490 m de profondeur, d'une matrice argileuse (40 – 50 %) contenant 20-30% de grains de carbonates, 20-30% de quartz et un peu de feldspaths.

Un certain nombre de contributions (Vincké et al., 1998; Bemmer et al., 2004) ont concerné la détermination du coefficient de Biot b , mais une certaine dispersion (b entre 0,33 et 0,95) caractérise les données disponibles. Ce travail concerne l'investigation expérimentale des paramètres poroélastiques du COx, à partir de l'utilisation d'une cellule de compression isotrope spécialement développée, comprenant un système de mesures locales de déformations axiales et radiales de précision.

2. Contexte poro-élastique

Dans le cadre de la poroélasticité isotrope transverse (Thompson and Willis, 1991; Detournay and Cheng, 1993). La loi de Hooke généralisée s'écrit

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{C}}^{-1} (\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{b}}u)$$

où $\underline{\underline{b}}$ est le tenseur des coefficients de Biot et $\underline{\underline{C}}^{-1}$ le tenseur élastique, soit :

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\varepsilon_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\sigma_1 - b_1 du \\ d\sigma_2 - b_2 du \\ d\sigma_2 - b_2 du \end{pmatrix} \quad (1)$$

Sous un incrément de contrainte isotrope ($d\sigma_1 = d\sigma_2 = d\sigma_3$), les déformations axiales et radiales s'écrivent :

$$d\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(d\sigma - b_1 du) - \frac{2\nu_{12}}{E_1}(d\sigma - b_2 du) \quad (2)$$

$$d\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}(d\sigma - b_1 du) + \frac{(1 - \nu_{23})}{E_2}(d\sigma - b_2 du) \quad (3)$$

où x_1 est perpendiculaire au litage et x_2 et x_3 sont parallèles au litage. E_1 et E_2 sont les modules de Young selon les directions x_1 et x_2 , respectivement, ν_{12} et ν_{23} sont les coefficients de Poisson dans les plans (x_1, x_2) et (x_2, x_3) , respectivement. A partir des équations (2) et (3), on peut écrire l'expression des modules anisotropes en compression isotrope drainée, non drainée et sans membrane, ainsi que lors d'un essai de chargement par changement de pression interstitielle. Les modules drainés D_1 and D_2 , mesurés avec $du = 0$, sont donnés par :

$$\frac{1}{D_1} = \frac{d\varepsilon_1}{d\sigma} = \frac{1}{E_1}(1 - 2\nu_{12}) ; \quad \frac{1}{D_2} = \frac{d\varepsilon_2}{d\sigma} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} + \frac{(1 - \nu_{23})}{E_2} \quad (4)$$

Les modules H_1 et H_2 , mesurés lors d'un essai où la pression interstitielle est changée en gardant la contrainte totale constante ($d\sigma = 0$) sont donnés par :

$$\frac{1}{H_1} = \frac{d\varepsilon_1}{du} = -\frac{b_1}{E_1} + 2\nu_{12} \frac{b_2}{E_1} ; \quad \frac{1}{H_2} = \frac{d\varepsilon_2}{du} = \frac{\nu_{12}}{E_1} b_1 - \frac{(1 - \nu_{23})}{E_2} b_2 \quad (5)$$

Lors d'un essai de compression sans membrane, qui consiste à augmenter simultanément la contrainte totale et la pression interstitielle ($d\sigma = du$), les modules S_1 et S_2 sont donnés par :

$$\frac{1}{S_1} = \frac{d\varepsilon_1}{d\sigma} = \frac{1}{E_1}((1 - b_1) - 2\nu_{12}(1 - b_2)) ; \quad \frac{1}{S_2} = \frac{d\varepsilon_2}{d\sigma} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}(1 - b_1) + \frac{(1 - \nu_{23})}{E_2}(1 - b_2) \quad (6)$$

Un essai de compression isotrope non-drainé permet la mesure des modules non drainés U_1 et U_2 selon les directions x_1 et x_2 , respectivement :

$$\frac{1}{U_1} = \frac{d\varepsilon_1}{d\sigma} = \frac{1}{E_1}((1 - b_1 B) - 2\nu_{12}(1 - b_2 B)) ; \quad \frac{1}{U_2} = \frac{d\varepsilon_2}{d\sigma} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}(1 - b_1 B) + \frac{(1 - \nu_{23})}{E_2}(1 - b_2 B) \quad (7)$$

Le coefficient B de Skempton (Skempton, 1954) est défini par $B = du/d\sigma$.

Dans une hypothèse d'isotropie poroélastique équivalente, souvent utilisée pour des calculs de la réponse poroélastique dans le champ proche (Gens et al. 2007), on retrouve l'expression classique :

$$d\varepsilon_v = -\frac{dV}{V_0} = \frac{1}{K_d} \left[d\sigma - du + \frac{K_d}{K_s} du \right] = \frac{1}{K_d} (d\sigma - b du) \quad (8)$$

où :

- K_d est le module de compression drainé ;

$$\frac{1}{K_d} = -\frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma_d} \right)_u = \frac{1}{D_1} + \frac{2}{D_2} \quad (9)$$

- b est le coefficient de Biot équivalent défini par :

$$b = 1 - \frac{K_d}{K_s} \quad (10)$$

- K_s est le module sans membrane :

$$\frac{1}{K_s} = -\frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial u} \right)_{\sigma_d} = \frac{1}{S_1} + \frac{2}{S_2} \quad (11)$$

- H est le module de Biot isotrope équivalent, déterminé par un chargement en pression interstitielle :

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial u} \right)_{\sigma} = \frac{1}{H_1} + \frac{2}{H_2} = \frac{b}{K_d} = \frac{1}{K_d} - \frac{1}{K_s} \quad (12)$$

L'équation (12) montre que, connaissant le module drainé K_d , la détermination de H permet une évaluation indirecte du coefficient b de Biot et du module sans membrane K_s . Le module de compression non drainé équivalent K_u est donné par :

$$\frac{1}{K_u} = -\frac{1}{V_0} \left(\frac{dV}{d\sigma} \right)_{m_f} = \frac{1}{U_1} + \frac{2}{U_2} \quad (13)$$

En remplaçant $du = B d\sigma$ dans l'équation (8), on obtient pour K_u :

$$K_u = \frac{K_d}{1 - b B} \quad (14)$$

Le programme expérimental adopté dans ce travail vise à la détermination des divers paramètres poroélastiques présentés ci-dessus.

3. Matériaux et méthodes

Deux éprouvettes (EST31912c and e) de 38 mm de diamètre et 10 mm de hauteur, dont l'axe est orienté perpendiculairement au litage et provenant d'un forage horizontal réalisé dans le laboratoire souterrain de Bure, ont été testés (Tableau 1). Leurs teneurs en eau (w), masse volumique (γ), masse volumique sèche (γ_d), indice des vides (e), degré de saturation (S_r) et porosité (ϕ) sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques initiales des éprouvettes testés.

Éprouvette	w (%)	γ (Mg/m ³)	γ_d (Mg/m ³)	e	S_r (%)	ϕ (%)
EST31912c	7,45	2,39	2,22	0,21	94,2	17,6
EST31912e	4,54	2,39	2,29	0,18	67,8	15,3

La cellule de compression isotrope utilisée est présentée en Figure 1 (voir Belmokhtar et al. (2016) pour plus de détails). Deux contrôleurs pression-volume (CPV, marque GDS) de 60 MPa de pression maximale ont été utilisés pour l'application de la contrainte de

confinement σ et de la pression interstitielle p_w . La longueur de drainage, égale à la hauteur de l'éprouvette (10 mm) permet de réaliser des essais drainés d'une durée raisonnable (Monfared *et al.* 2011).

L'éprouvette est placée dans une membrane spéciale continue qui enveloppe le sommet et la surface latérale de l'éprouvette. Les mesures locales axiales et radiales de déformations sont faites par des capteurs LVDTs dont l'aiguille est mise en contact direct avec l'éprouvette au travers de la membrane, l'étanchéité étant assurée par une goutte de colle néoprène placée au contact aiguille-membrane. La cellule est placée dans un bain thermostaté pour un bon contrôle de la température, et un capteur de pression permet la mesure des variations de pression interstitielle.

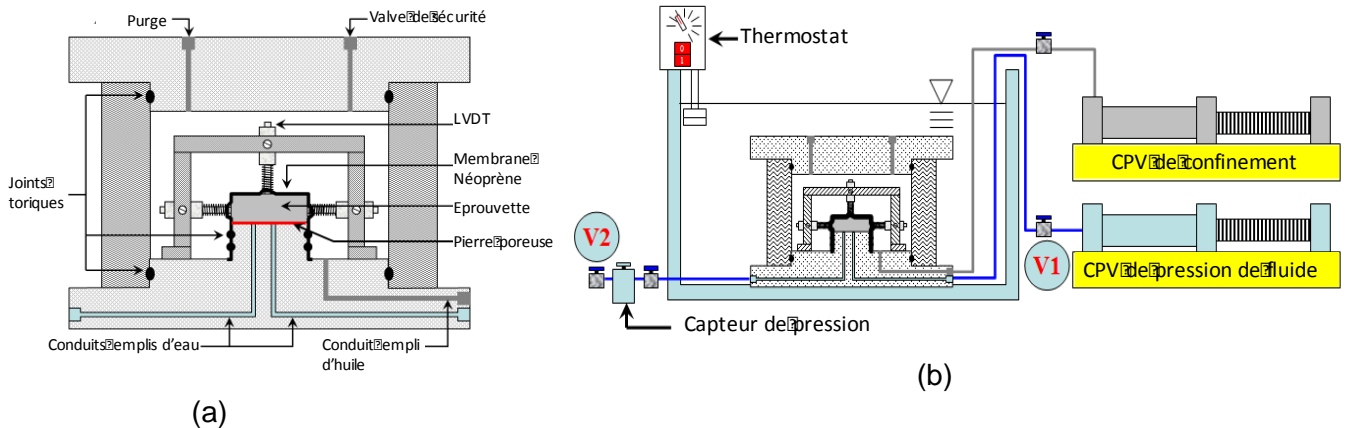


Figure 1. (a) Cellule de compression isotrope ; (b) ensemble du dispositif avec les CPVs, le bain thermostaté et le capteur de pression.

La resaturation est effectuée en faisant pénétrer l'eau dans le système de drainage après avoir mis l'éprouvette et le système de drainage sous vide, sous un état de contrainte effective de Terzaghi ($\sigma = 8$ MPa, $p_w = 0$ MPa) proche de l'état in-situ ($\sigma = 12$ MPa, $p_w = 4$ MPa), afin de minimiser le gonflement et le dommage associé. σ et p_w sont ensuite progressivement élevés jusqu'à atteindre respectivement 12 et 4 MPa.

Dans les géomatériaux de faible perméabilité, les taux de variation de contrainte doivent être suffisamment faibles lors d'essais drainés pour assurer l'homogénéité du champ de pression interstitielle (Gibson and Henkel, 1954). Des calculs poroélastiques (Belmokhtar *et al.*, 2016) ont montré qu'un taux de 0,5 kPa/min était convenable pour réaliser un essai drainé, et qu'un taux de 2 kPa/min était adapté pour un essai sans membrane. Il convient également de prendre en compte les effets parasites du système de drainage pour la détermination des paramètres non-drainés (Bishop 1976; Ghabezloo and Sulem 2010; Monfared *et al.* 2011).

4. Résultats expérimentaux

Les paramètres isotropes transverses des équations (4) à (11) peuvent être déterminés par i) un essai de compression drainé dans lequel la contrainte σ est changée en maintenant la pression p_w nulle ($\Delta p_w = 0$), ii) un essai dans lequel la pression p_w est changée sous contrainte totale σ constante ($\Delta \sigma = 0$), iii) un essai sans membrane avec augmentation simultanée de contrainte totale et de pression ($\Delta p_w = \Delta \sigma$) et iv) un essai de compression non drainée pour la détermination du coefficient de Skempton B . Ces essais ont été conduits sous deux valeurs de contrainte isotrope effective initiale : 10 MPa (essais EST31912c) et 8 MPa (essai EST31912e).

4.1. Essai de compression isotope drainé

On observe en Figure 2 les résultats de cycles de déchargement-rechargement drainés conduits à un taux de 0,5 kPa/min avec une contre pression de 4 MPa sur une gamme de contrainte de l'ordre de 500 kPa. On observe une réponse anisotrope, avec des déformations radiales plus faibles. On détermine les modules $D_1 = 5,6$ GPa (axial) et $D_2 = 12,8$ GPa (radial) pour l'éprouvette EST31912c, et $D_1 = 3,7$ GPa et $D_2 = 9$ GPa pour l'éprouvette EST31912e. On obtient des valeurs de module drainé isotope équivalent $K_d = 10$ MPa (EST31912c) et $K_d = 8$ MPa (EST31912e). Logiquement, un plus fort module est observé à la plus forte contrainte.

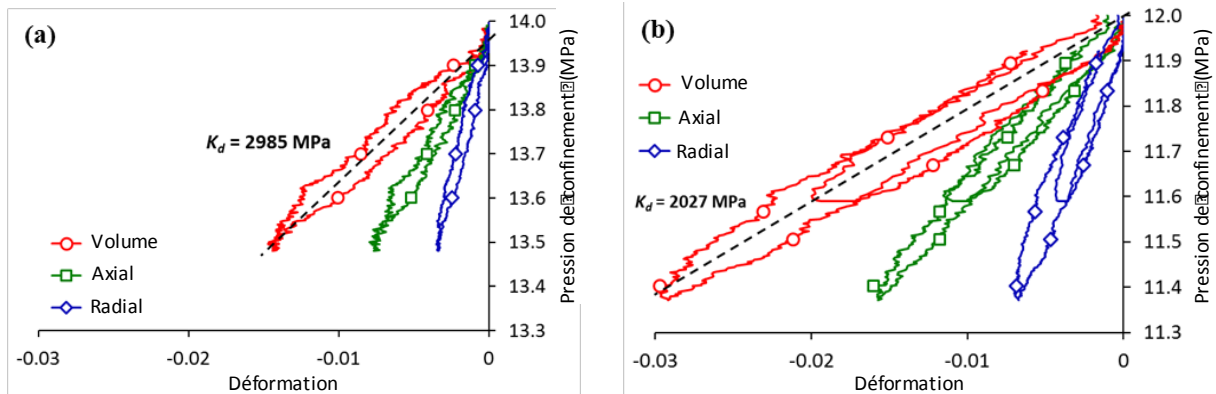


Figure 2. Cycles de compression isotope drainée : (a) EST31912c, (b) EST31912e.

4.2. Essai avec changement de pression interstitielle

La pression de fluide a été changée à un taux de 0,5 kPa/min sous contrainte de confinement constante et une réponse linéaire et anisotrope est obtenue (Figure 5).

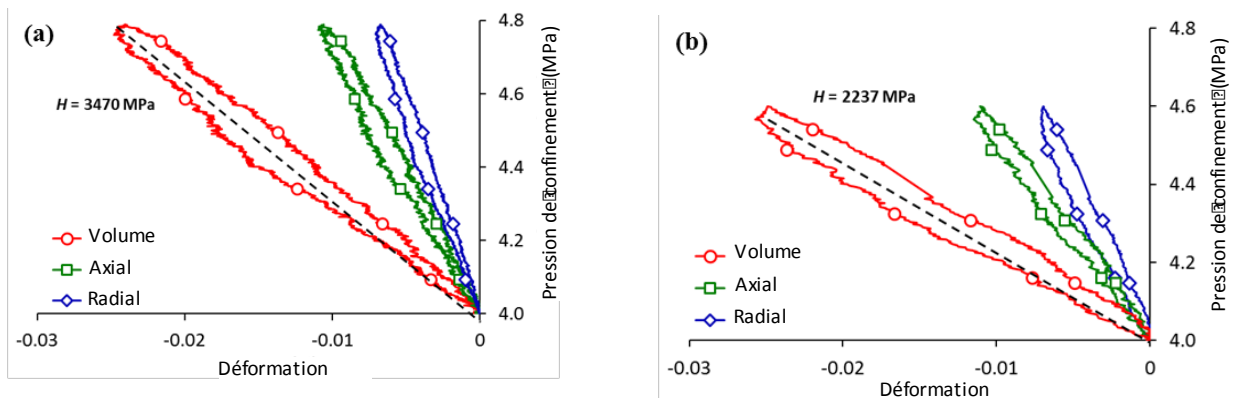


Figure 3. Essais en variation cyclique de pression interstitielle : (a) EST31912c, (b) EST31912e.

Les modules H_1 et H_2 selon les directions axiales et radiales sont respectivement égaux à 7,3 GPa et 13 GPa pour l'éprouvette EST31912c, et à 5,2 GPa et 7,7 GPa pour EST31912e. Les modules de Biot isotropes équivalents H valent 3,47 GPa pour l'éprouvette EST31912c et 2,24 GPa pour l'éprouvette EST31912e.

4.3. Essai de compression sans membrane

L'essai de compression sans membrane, qui mobilise la compression de la phase solide, a été réalisé sur l'éprouvette EST31912c à un taux de chargement de 2 kPa/min (Figure 4).

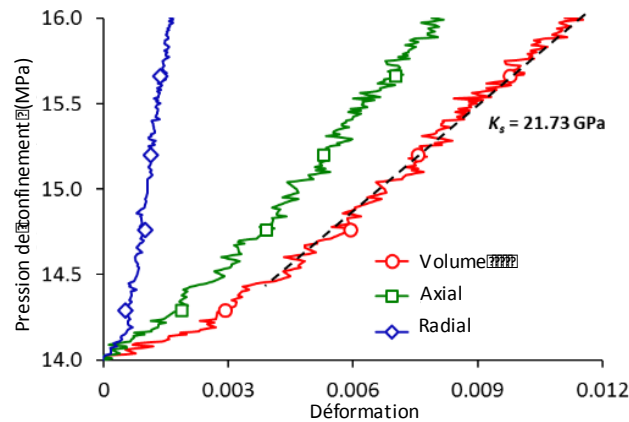


Figure 4. Essai de compression sans membrane (EST31912-c).

Sous le confinement maximal (16 MPa), une déformation axiale de 0,012% est obtenue, avec une valeur de module de compression sans membrane isotrope équivalent de 21,73 GPa.

4.4. Essai de compression non drainée

Une séquence de déchargement non drainé a été réalisée sur l'éprouvette EST31912c et 4 cycles ont été conduits sur l'éprouvette EST31912e. On observe (Figure 5) des réponses linéaires et clairement anisotropes avec un module de compression non drainé mesuré de 7,09 GPa pour EST31912c et de 6,48 GPa pour EST31912e, correspondant à des valeurs corrigées respectives de 12,42 et 10,93 GPa, avec un module plus fort sous la plus forte contrainte de confinement.

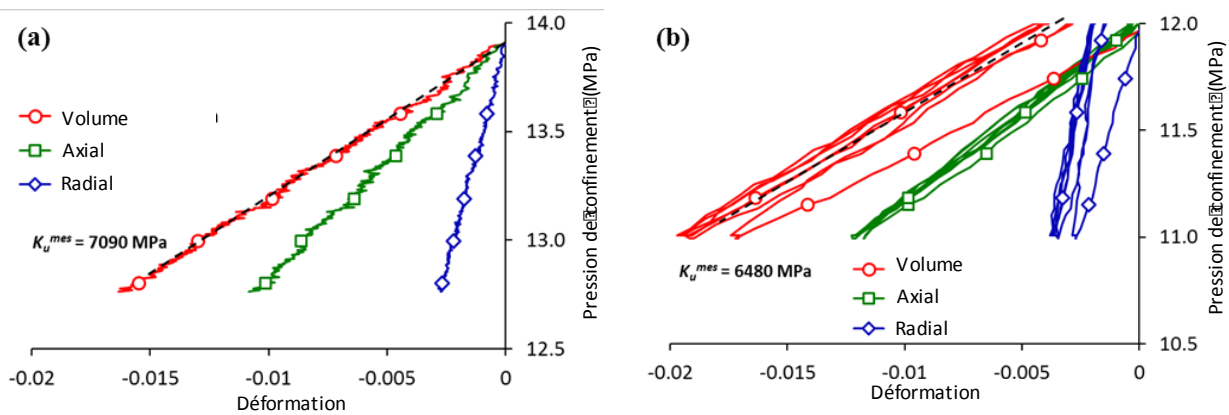
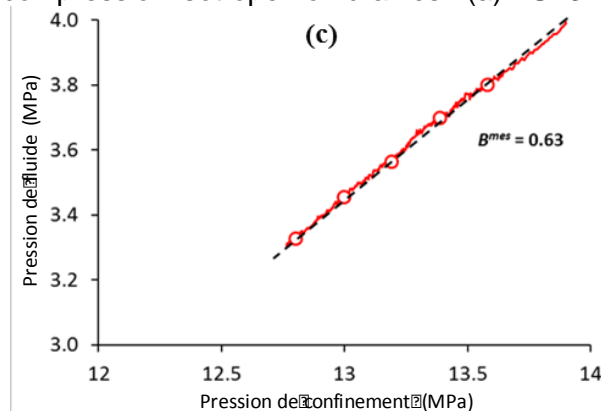


Figure 5. Essais de compression isotrope non drainés : (a) EST31912c, (b) EST31912e.

Figure 6. Coefficient B de Skempton, EST31912c.

La Figure 6 montre que la valeur mesurée B^{mes} vaut 0,63, elle correspond à une valeur corrigée de 0,84, comparable à celle obtenue par Mohajerani et al. (2013).

5. Analyse des résultats

A partir des équations (4) et (5), on peut écrire les relations suivantes, qui dépendent également d'un paramètre non déterminé, le coefficient de Poisson ν_{12} :

$$b_1 = -2\nu_{12} \left[\left(\frac{\nu_{12}}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) / \left(\frac{\nu_{12}}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \right] - (1 - 2\nu_{12}) \frac{D_1}{H_1} \quad (15)$$

$$b_2 = - \left[\left(\frac{\nu_{12}}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) / \left(\frac{\nu_{12}}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \right] \quad (16)$$

On présente au Tableau 2 les valeurs calculées de b_1 et b_2 pour diverses valeurs de ν_{12} comprises entre des limites raisonnables de 0,25 et 0,35.

Tableau 2. Calculs de b_1 et b_2 pour différents ν_{12} .

	EST31912c ($\sigma_d = 10$ MPa)						EST31912e ($\sigma_d = 8$ MPa)					
	D_1 (GPa)	D_2 (GPa)	H_1 (GPa)	H_2 (GPa)	b_1	b_2	D_1 (GPa)	D_2 (GPa)	H_1 (GPa)	H_2 (GPa)	b_1	b_2
0,25	5,6	12,8	-7,3	-13	0,836	0,906	3.7	9	-5.2	-7.7	0,854	0,996
0,30					0,845	0,896					0,87	0,976
0,35					0,852	0,888					0,884	0,959

Les valeurs obtenues de b_1 et b_2 présentent une faible dépendance par rapport à ν_{12} . En adoptant $\nu_{12} = 0,3$ (Menaceur et al. 2015), on obtient $b_1 = 0,845$ et $b_2 = 0,896$ sous $\sigma_d = 10$ MPa (EST31912c), et $b_1 = 0,870$ et $b_2 = 0,976$ sous 8 MPa (EST31912e).

La valeur du coefficient b poroélastique isotrope équivalent peut-être obtenu en utilisant l'un des relations ci-dessous :

$$b = \begin{cases} \frac{K_d}{H} & (a) \\ 1 - \frac{K_d}{K_s} & (b) \\ \frac{1}{B} \left(1 - \frac{K_d}{K_u} \right) & (c) \\ \frac{K_u}{BK_u + H} & (d) \\ \frac{K_u(K_s - K_d)}{K_s(K_u - K_d) + H(K_s - K_d)} & (e) \end{cases} \quad (17)$$

Les calculs donnent les valeurs suivantes :

Tableau 3. Valeurs de b selon les relations a) à e)

Relation	a)	b)	c)	d)	e)
EST31912c ($\sigma_d = 10$ MPa)	0,86	0,85	0,91	0,89	0,86
EST31912e ($\sigma_d = 8$ MPa)	0,91	0,90	-	-	0,91

Ces valeurs comparables montrent une bonne compatibilité entre les relations considérées, signe de la qualité de la détermination des divers paramètres drainés et non-drainés. Les valeurs moyennes de b obtenues sont égales à 0,87 (10 MPa) et 0,91 (8 MPa).

6. Conclusions

Du fait de la dispersion observée dans les valeurs expérimentales publiées des paramètres poroélastiques de l'argilite du Callovo-Oxfordien, un programme de détermination à l'aide d'essais drainés et non drainés sur des éprouvettes saturées a été conduit à l'aide d'une cellule de compression isotrope à chemin de drainage réduit (10 mm), avec mesures locales de déformations de précision. Une analyse dans un cadre poroélastique isotrope transverse a permis la détermination des paramètres de Biot b_1 (perpendiculaire au litage) et b_2 (parallèle au litage).

On propose également des valeurs de paramètres poroélastiques équivalents : module de compression drainé K_d , module non-drainé K_u , coefficient de Skempton B , module de compression sans membrane K_s and module de Biot H . Sur les éprouvettes testées qui proviennent d'une profondeur de 490 m avec une fraction argileuse proche de 50%, on obtient une valeur de b de 0,91 sous les contraintes en place ($\sigma = 12$ MPa and $p_w = 4$ MPa). Il est à noter que les paramètres déterminés ici l'ont été sur des éprouvettes extraites, et que des réflexions complémentaires sont à mener pour l'estimation des paramètres de la roche en place, tenant compte d'effets possibles de l'extraction et de la préparation des éprouvettes.

7. Références bibliographiques

- Belmokhtar M, Delage P, Ghabezloo S (2016). Poroelasticity of the Callovo–Oxfordian Claystone. *Rock Mech Rock Eng.* 50 (9), 2297–2309.
- Bemer E, Longuemare P, Vincké O (2004). Poroelastic parameters of Meuse/Haute Marne argillites: effect of loading and saturation states. *Appl Clay Sci* 26:359–366.
- Detournay E, Cheng AH (1993). Fundamentals of Poroelasticity. Chapter 5. ed C Fairhurst, Pergamon Press II:113–171.
- Ghabezloo S, Sulem J (2010). Effect of the volume of the drainage system on the measurement of undrained thermo-poro-elastic parameters. *Int J Rock Mech Min Sci* 47:60–68.
- Gibson RE, Henkel DJ (1954). Influence of Duration of tests at Constant Rate of Strain on Measured “Drained” Strength. *Géotechnique* 4:6–15.
- Menaceur H, Delage P, Tang A-M, Conil N (2015). The thermo-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian claystone. *Int J Rock Mech Min Sci* 78:290–303.
- Mohajerani M, Delage P, Sulem J, et al (2013). The Thermal Volume Changes of the Callovo–Oxfordian Claystone. *Rock Mech Rock Eng* 47:131–142.
- Skempton AW (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique* 4:143–147.
- Thompson M, Willis JR (1991). A Reformulation of the Equations of Anisotropic Poroelasticity. *J Appl Mech* 58:612–616.
- Vincké O, Longuemare P, Boutéca M, Deflandre J-P (1998). Investigation of the poromechanical behavior of shales in the elastic domain. *Pap SPE* 47589 1–6.