



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA

DOSSIER PUBLIC 7983

**Étude des données géomécaniques de laboratoire des
carottes d'un puits pétrolier et gazier
(Talisman, Saint-Édouard No 1)
Région de Saint-Édouard, Québec**

S. Séjourné

2016

Canada



**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 7983**

**Étude des données géomécaniques de laboratoire des
carottes d'un puits pétrolier et gazier (Talisman, Saint-
Édouard No 1), région de Saint-Édouard, Québec**

S. Séjourné

Géologue consultant, Montréal, Québec

2016

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2016

doi:10.4095/297780

On peut télécharger cette publication gratuitement à partir de GEOSCAN (<http://geoscan.rncan.gc.ca/>)

Notation bibliographique conseillée

Séjourné, S., 2016. Étude des données géomécaniques de laboratoire des carottes d'un puits pétrolier et gazier (Talisman, Saint-Édouard No 1), région de Saint-Édouard, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 7983, 54p. doi:10.4095/297780

Les publications de cette série ne sont pas révisées, elles sont publiées telles que soumises par l'auteur.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des annexes.....	iv
Résumé.....	5
1. Introduction.....	7
1.1 Mise en contexte de l'étude.....	7
1.2 Objectifs du rapport	7
2. Considérations géomécaniques	8
2.1 Définitions	8
2.2 Applications en géologie pétrolière	9
3. Intégration des données.....	10
3.1 Données disponibles	10
3.2 Contrôle de qualité.....	11
4. Analyse des propriétés des coulis	12
4.1 Observations.....	12
4.2 Synthèse	18
5. Tests statiques sur les shales.....	19
5.1 Observations.....	19
5.2 Synthèse	22
6. Tests dynamiques sur les shales.....	22
6.1 Observations.....	22
6.2 Synthèse	29
7. Comparaison des résultats statiques et dynamiques.....	30
7.1 Observations.....	30
7.2 Synthèse	31
8. Comparaison avec les diagraphies	31
8.1 Observations.....	31

8.2 Synthèse 33

9. Conclusions et recommandations 36

Remerciements 38

Références..... 39

Liste des figures

Figure 1 : Modules élastiques dynamiques et statiques pour l'ensemble de la banque de données (carottes de shale pur ou carottes compensées, coulis purs de ciment ou de gypse).	12
Figure 2 : Vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour les coulis de ciment et de gypse.....	13
Figure 3 : Vitesses de propagation des ondes P mesurées pour les coulis de ciment ou de gypse, comparées à la densité des coulis.....	13
Figure 4 : Vitesses de propagation des ondes S mesurées pour les coulis de ciment ou de gypse, comparées à la densité des coulis.....	14
Figure 5 : Comparaison des modules élastiques dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse.	15
Figure 6 : Comparaison des coefficients de Poisson dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse avec la densité des coulis.....	16
Figure 7 : Comparaison des modules de Young dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse avec la densité des coulis.....	16
Figure 8 : Comparaison des modules de Young dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse.	17
Figure 9 : Comparaison des coefficients de Poisson dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse.	17
Figure 10 : Comparaison des modules élastiques statiques calculés pour les échantillons du Groupe de Lorraine et du Shale d'Utica.	19
Figure 11 : Comparaison des modules élastiques statiques calculés selon la nature du test, compression uniaxiale ou triaxiale.	20
Figure 12 : Comparaison des modules élastiques statiques calculés selon la nature du coulis utilisé pour compenser la carotte.	20
Figure 13 : Étalement des valeurs des modules de Young en fonction de la pression de confinement (9 échantillons).	21
Figure 14 : Étalement des valeurs des coefficients de Poisson en fonction de la pression de confinement (10 échantillons).	21
Figure 15 : Vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour l'ensemble des carottes de shale pur et compensées (10 échantillons).....	23
Figure 16 : Comparaison des vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour l'ensemble des carottes de shale pur et compensées pour les échantillons du Groupe de Lorraine et du Shale d'Utica. .	23
Figure 17 : Comparaison des vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour les échantillons de shale pur ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse.....	24
Figure 18 : Variation des vitesses de propagation des ondes P mesurées pour les échantillons de shale pur ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse, en fonction de la densité du shale.....	25
Figure 19 : Étalement des vitesses de propagation de l'onde P mesurée en fonction de la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).	25

Figure 20 : Variation des vitesses de propagation des ondes S mesurées pour les échantillons de shale pur ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse, en fonction de la densité du shale.....	26
Figure 21 : Étalement des vitesses de propagation de l'onde S mesurée en fonction de la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).	26
Figure 22 : Comparaison des modules élastiques dynamiques en fonction de la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).	27
Figure 23 : Comparaison des modules élastiques dynamiques pour les échantillons du Groupe de Lorraine et du Shale d'Utica.	28
Figure 24 : Corrélation entre le module de Young dynamique calculé et la vitesse de propagation mesurée de l'onde P et de l'onde S.....	28
Figure 25 : Corrélation entre le coefficient de Poisson dynamique calculé et la vitesse de propagation mesurée de l'onde P et de l'onde S.....	29
Figure 26 : Comparaison entre les valeurs des coefficients de Poisson dynamiques et statiques selon la nature du matériau testé (échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).	30
Figure 27 : Comparaison entre les valeurs des modules de Young dynamiques et statiques selon la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).	31
Figure 28 : Corrélation entre les vitesses de propagation des ondes P et S mesurées en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et en diagraphies (puits gazier A267).	32
Figure 29 : Comparaison entre les modules élastiques calculés à partir des tests réalisés en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et à partir des diagraphies du puits A267.....	33
Figure 30 : Comparaison entre les vitesses de propagation des ondes P et S mesurées en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et en diagraphies (puits profonds A266, A267, A279 et puits peu profonds F1, F3, F7, F8 et F21).	34
Figure 31 : Comparaison entre les modules élastiques calculés à partir des tests dynamiques réalisés en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et à partir des diagraphies des puits A266, A267, A279, F8 et F21.....	35

Liste des annexes

Annexe 1 : Caractéristiques générales des échantillons analysés en laboratoire.	41
Annexe 2 : Description du mode de rupture observé.	44
Annexe 3 : Mesures de densité et résultats des tests dynamiques.	47
Annexe 4 : Résultats des tests statiques.	50

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une étude plus vaste traitant des impacts potentiels sur les aquifères des activités liées à l'exploration pour le gaz de shale dans la région de Saint-Édouard (Basses-Terres du Saint-Laurent, Province de Québec), réalisée par le programme Géoscience environnementale du Secteur des Sciences de la Terre (Commission géologique du Canada, division Québec – CGC-Québec) et financé par les programmes de l'Initiative ÉcoÉnergie sur l'Innovation et PRDE (Programme de recherche et de développement énergétiques) du Secteur de l'Énergie.

Un des aspects de cette étude régionale porte notamment sur les propriétés géomécaniques du Shale d'Utica et de sa couverture. Ces propriétés mécaniques ont été estimées à partir des diagraphies de plusieurs forages pétroliers et gaziers, mais les résultats obtenus demeurent indicatifs et qualitatifs en l'absence de calibration par des analyses de laboratoire. Pour fins de calibration, des échantillons de carottes prélevées lors du forage du puits Talisman, Saint-Édouard No 1. Cependant, l'essentiel du matériel disponible se présentait sous forme de carottes tronquées dans le sens de la longueur et les échantillons ont dû être préalablement compensés à l'aide d'un coulis de ciment ou de gypse avant de pouvoir procéder aux tests géomécaniques en laboratoire. Il s'agit-là d'une déviation majeure par rapport aux normes et procédures habituelles, qui pourrait représenter une percée méthodologique importante. L'objectif principal de l'analyse présentée ici consistait donc à vérifier la robustesse de la méthode et la validité des résultats des tests géomécaniques pratiqués sur les carottes tronquées et compensées, en se servant principalement des résultats de propriétés géomécaniques obtenus à partir de diagraphies acoustiques et pétrophysiques.

Les résultats des tests dynamiques pratiqués en laboratoire dans le cadre de la présente étude paraissent homogènes et généralement peu questionnables, autant dans le cas des échantillons de coulis purs que dans le cas des carottes de shale pur ou compensées. Dans l'ensemble, les résultats des tests dynamiques semblent cohérents et recevables même si une population statistique plus importante aurait été souhaitable. La comparaison des résultats des tests dynamiques avec les diagraphies disponibles pour le puits A267, ainsi que pour d'autres puits pétroliers et gaziers et pour les puits peu profonds de la série F (puits de 30 à 150 m forés dans le cadre du projet Saint-Édouard) suggère que les faibles valeurs du module de Young dynamique obtenues en laboratoire peuvent être expliquées par une perte d'intégrité structurale des carottes avant leur analyse, soit durant leur prélèvement, leur transport ou leur manipulation au laboratoire. Des inconnues demeurent, notamment en ce qui a trait à l'hétérogénéité et à l'anisotropie des matériaux testés : homogène et isotrope dans le cas des coulis purs, hétérogène et anisotrope dans le cas des shales purs, et d'une complexité accrue dans le cas des carottes de shale tronquées et compensées par un coulis. Pour évaluer l'influence de ces facteurs sur la variabilité observée des résultats, il est recommandé dans ce document de caractériser l'anisotropie des carottes de shale pur et compensées en pratiquant des tests acoustiques selon différentes orientations par rapport à l'axe long des carottes.

Contrairement aux résultats des tests dynamiques, les résultats des tests statiques réalisés en laboratoire sur les échantillons témoins de coulis de gypse et de ciment, ainsi que sur les échantillons de carottes de shale pur ou compensées, font preuve d'une grande hétérogénéité, en particulier en ce qui concerne le calcul du coefficient de Poisson. Cette observation sème le doute quant à la reproductibilité des analyses statiques et la faible densité statistique des données disponibles ne permet pas de lever ce doute et de confirmer la reproductibilité des tests pratiqués. Par ailleurs une proportion appréciable des valeurs de coefficient de Poisson statiques calculées s'avère supérieures à 0,5, ce qui est incompatible avec la définition classique du coefficient de Poisson pour les matériaux linéaires élastiques, et rarissime dans la littérature. De plus, ceci les rend impropres au calage des coefficients de Poisson dynamiques, qui ne peuvent excéder une valeur de 0,5.

L'objectif des tests statiques étant le calage des résultats dynamiques, il apparaît important de revoir le protocole analytique suivi pour les analyses statiques de manière à pouvoir comparer les résultats statiques et dynamiques. La révision du protocole d'analyse des tests statiques s'avère également nécessaire de manière à clarifier l'influence que la présence d'un coulis peut exercer sur les résultats d'analyse des carottes compensées. La compréhension de ces mécanismes est considérée comme un préalable à la poursuite des analyses sur des carottes compensées, et une démarche expérimentale est proposée en ce sens, qui pourra être adaptée selon les besoins et les avis des chercheurs impliqués dans le projet :

- 1) Stabilité des coulis purs et reproductibilité des tests statiques pratiqués :
 - Pour les coulis déjà utilisés, comparer leurs propriétés et la variabilité des résultats aux propriétés de coulis préparés dans des conditions similaires dans le même laboratoire dans le cadre d'autres projets, ou à des bases de données extérieures.
 - Pour les coulis qui seront préparés dans le futur : identifier de possibles variations dans les conditions expérimentales (pureté du matériau, durée de mûrissement, taux de chargement, etc.) et établir le protocole de préparation qui offre la meilleure reproductibilité.
 - Comparer la sensibilité des mesures réalisées sur ces nouveaux coulis (stables) avec les erreurs instrumentales intrinsèques.
- 2) Influence de la compensation sur les carottes :
 - Préparer et tester une série de paires d'échantillons constituées d'un échantillon de coulis pur et d'un échantillon du même coulis, tronqué et compensé par un coulis aux propriétés différentes (par exemple, ciment et gypse, ou deux ciments de densités différentes).
 - Procéder de la même manière avec des paires d'échantillons constituées d'une carotte de roche pure (shale si possible) et d'une carotte de roche tronquée et compensée par un coulis.

Pour la réalisation de la dernière étape (validation de la méthode avec des échantillons de roche), une source possible pour ces échantillons serait les carottes prélevées dans les puits peu profonds (50 à 150 m) forés par la CGC-Québec en 2014. Ces carottes sont la propriété de la CGC et on dispose d'un enregistrement diagraphique presque complet pour comparer les résultats dynamiques.

1. Introduction

1.1 Mise en contexte de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une étude plus vaste traitant des impacts potentiels sur les aquifères des activités liées à l'exploration pour le gaz de shale dans la région de Saint-Édouard-de-Lotbinière (Basses-Terres du Saint-Laurent, Province de Québec), réalisée par le programme Géoscience environnementale du Secteur des Sciences de la Terre (Commission géologique du Canada, division Québec – CGC-Québec) et financé par les programmes Initiative ÉcoÉnergie sur l'Innovation et PRDE (Programme de recherche et de développement énergétiques) du Secteur de l'Énergie.

Un des aspects de cette étude régionale porte notamment sur les propriétés géomécaniques du Shale d'Utica et de sa couverture (les shales et siltstones des groupes de Lorraine et de Sainte-Rosalie). Ces propriétés mécaniques ont été estimées à partir des diagraphies de plusieurs forages pétroliers et gaziers (Séjourné, 2014), mais les résultats obtenus demeurent indicatifs et qualitatifs en l'absence de calage à l'aide d'analyses de laboratoire.

Pour fins de calibration, la CGC-Québec a transmis au Laboratoire de mécanique des roches de CanmetMINES des échantillons de carottes prélevées lors du forage du puits Talisman, Saint-Édouard No 1 (A267). Cependant l'essentiel du matériel disponible se présentait sous forme de carottes tronquées dans le sens de la longueur, la contrepartie ayant été utilisée pour réaliser d'autres analyses. Les échantillons de carottes tronquées ont dû être préalablement compensés avec du coulis de ciment ou de gypse avant de pouvoir procéder aux tests géomécaniques en laboratoire. Il s'agit-là d'une déviation majeure par rapport aux normes et procédures habituelles et cette démarche a fait l'objet d'une publication par le maître d'œuvre des analyses de laboratoire (Labrie, 2015). Si la méthode peut être validée, ce succès représentera une percée méthodologique importante.

1.2 Objectifs du rapport

Une première tentative pour intégrer directement les données de laboratoire aux diagraphies en vue de caler celles-ci s'est soldée par un échec qui a incité à examiner en détail les résultats analytiques, en préalable à toute intégration aux diagraphies.

L'objectif principal de l'analyse présentée ici consiste donc à vérifier la robustesse de la méthode et la validité des résultats des tests géomécaniques pratiqués sur les carottes tronquées et compensées.

Dans un second temps, les données de laboratoire sont comparées aux propriétés géomécaniques dérivées des diagraphies du puits d'où proviennent les carottes (A267), ainsi qu'à une série de puits stratigraphiques peu profonds forés par la CGC-Québec dans la région d'intérêt.

2. Considérations géomécaniques

2.1 Définitions

Les propriétés géomécaniques des matériaux géologiques peuvent être déterminées de manière directe et indirecte. **Les méthodes statiques** sont des méthodes directes et destructives qui consistent en des essais de compression réalisés sur des échantillons de roche en laboratoire. On parle alors d'essais statiques et de propriétés mécaniques statiques. On distingue deux principaux types d'essais statiques : les essais uniaxiaux sont réalisés en appliquant une pression le long d'un seul axe de l'échantillon, sans que celui-ci soit confiné; les essais triaxiaux sont réalisés de la même manière, mais en appliquant une pression de confinement perpendiculairement ou de façon isotrope, comme c'est le cas avec le système de chargement utilisé aux laboratoires CanmetMINES. L'intensité de cette pression de confinement peut varier selon les besoins. Le protocole d'analyse de ces essais statiques est codifié par la norme ASTM D7012 (ASTM, 2015b). **Les méthodes dynamiques** sont des méthodes indirectes et non destructives qui consistent à mesurer la vitesse de propagation des ondes P (de compression) et S (de cisaillement) dans le matériau étudié. On parle alors d'essais dynamiques et de propriétés mécaniques dynamiques. On distingue deux principaux types d'essais dynamiques : les essais réalisés en laboratoire sur des échantillons de roche, et les enregistrements diagraphiques réalisés dans les trous de forage. Le protocole d'analyse des essais dynamiques réalisés en laboratoire est codifié par la norme ASTM D2845 (ASTM, 2015a). Ces différents tests statiques et dynamiques permettent de calculer les modules élastiques du matériau étudié, dont les plus communément utilisés en géologie pétrolière sont le coefficient de Poisson et le module de Young.

Le coefficient de Poisson (ν) est un module élastique qui correspond au rapport entre le raccourcissement axial d'un matériau soumis à une pression le long de cet axe et l'allongement du matériau selon les autres axes. Ce coefficient traduit donc la propension de la roche à se dilater dans une direction perpendiculaire à celle où la contrainte est exercée (Zoback, 2007). Le coefficient de Poisson est sans dimension et est communément compris entre 0 et 0,5. Une valeur faible proche de 0 caractérise un matériau qui se dilate peu (ou pas lorsque $\nu = 0$, comme dans le cas du liège) dans la direction perpendiculaire à l'axe selon lequel il est comprimé. De très rares matériaux dits auxétiques ont un ν compris entre -1 et 0, mais ils ne se rencontrent pas dans la nature. À l'inverse, une valeur élevée proche de 0,5 (0,5 dans le cas extrême du caoutchouc) caractérise un matériau plus ductile qui tend à se dilater dans une direction perpendiculaire à l'axe selon lequel il est comprimé. Selon cette définition, la valeur extrême de 0,5 correspond aux liquides incompressibles et les matériaux naturels ne peuvent avoir un ν supérieur à 0,5. Certaines études font toutefois état de valeurs de ν statiques en laboratoire allant jusqu'à 2 (Fjaer et al., 2005), qui sont expliquées par le fait que les matériaux naturels telles les roches sédimentaires ne sont pas parfaitement élastiques et linéaires. En pratique cependant, les ν dynamiques obtenus en laboratoire sur les mêmes matériaux demeurent compris entre 0 et 0,5 (Fjaer et al., 2005).

Dans les tests statiques réalisés en laboratoire, le coefficient de Poisson est estimé directement en mesurant le raccourcissement axial du matériau et son allongement selon les autres axes (e.g., déformation radiale). Dans les tests dynamiques réalisés en laboratoire et dans les évaluations

péetrophysiques des diagrapies, le coefficient de Poisson est estimé à partir des vitesses de propagation des ondes P et S, soit V_p et V_s dans l'équation 1 ci-dessous (Zoback, 2007) :

$$\text{Coefficient de Poisson } (\nu) = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

Le module de Young (E) est un module élastique qui correspond au rapport entre la compression ou la tension exercée selon un axe et la déformation subie le long du même axe. Ce module traduit donc la rigidité d'un matériau soumis à une contrainte uniaxiale non confinée (Zoback, 2007). Le module de Young est exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals (GPa). Une valeur élevée caractérise une roche plus rigide qui tend à se déformer de manière cassante sous l'effet d'une contrainte. Un module de cisaillement (G) peut être défini de la même manière que le module de Young, pour traduire la rigidité de la roche soumise à une contrainte de cisaillement.

Dans les tests statiques réalisés en laboratoire, le module de Young est déterminé en fonction de la pente que dessine la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale. En pratique, plusieurs méthodes existent pour arriver à cette fin (ASTM, 2015b) et le choix peut influencer le résultat final dans le cas des matériaux non élastiques. Dans les tests dynamiques réalisés en laboratoire et dans les évaluations péetrophysiques des diagrapies, le module de Young est dérivé du module de cisaillement et du coefficient de Poisson (équation 2) et dépend donc des vitesses de propagation des ondes P et S, ainsi que de la mesure de la densité totale RHOB (équations 1 et 3, tirées de Zoback, 2007).

$$\text{Module de Young } (E) = 2 G (1 + \nu) \quad (2)$$

$$\text{Module de cisaillement } (G) = \frac{RHOB \times 10^3}{(1/V_s)^2} \quad (3)$$

2.2 Applications en géologie pétrolière

L'intégration des modules élastiques en ingénierie et en géologie pétrolières répond à de nombreux objectifs, depuis l'évaluation des attributs sismiques avant forage jusqu'à la prédiction de la stabilité des failles soumises à des contraintes naturelles ou anthropiques. Bien que largement répandues, ces applications n'échappent pas à un certain degré d'incertitude, voire de controverse, car il s'agit d'appliquer des principes géomécaniques développés pour des matériaux élastiques linéaires isotropes à des matériaux sédimentaires, non élastiques et non isotropes (Thomsen, 1990; Fjaer et al., 2005).

La principale source d'information utilisée pour estimer les modules élastiques provient des diagrapies acoustiques. Ces dernières présentent l'avantage de couvrir de grands intervalles stratigraphiques au sein d'un même trou de forage et de permettre de corréliser les informations d'un puits à l'autre. Les diagrapies ont cependant l'inconvénient d'enregistrer une réponse acoustique qui peut être influencée par de nombreux facteurs tels la géologie, la rugosité du trou de forage, la densité de la boue de forage, la condition de l'outil, etc. Pour s'affranchir de ces influences, il est donc souhaitable de pouvoir caler les enregistrements diagrapiques (dynamiques) à partir d'essais de laboratoire (statiques et dynamiques)

réalisés sur un nombre d'échantillons de carottes restreint mais représentatif des différentes lithologies rencontrées dans le puits.

Les résultats des essais de laboratoire présentent toutefois leurs propres limitations. Les carottes sont en général peu nombreuses, elles couvrent rarement toutes les lithologies et sont souvent restreintes au réservoir ciblé. La manipulation des carottes depuis leur prélèvement sur le site de forage jusqu'à leur arrivée au laboratoire peut également s'accompagner d'une dégradation de leur intégrité structurale qui tend à décroître les valeurs de module de Young calculées (Li et Schmitt, 1997) et de la perte des fluides de formation qui tend à décroître les valeurs de coefficient de Poisson calculées (Barree et al., 2009). En outre, il est parfois difficile de reproduire en laboratoire les conditions de pression et de température qui caractérisent les formations étudiées en profondeur. À ces limitations pratiques s'ajoutent les marges d'erreurs expérimentales dans le cas des mesures statiques (Kuhinek et al., 2011).

Malgré ces limitations, il est souvent possible d'obtenir des calages réalistes – mais non exacts – lorsque les protocoles d'échantillonnage et d'analyse sont respectés, et on y procède de façon routinière dans l'industrie pétrolière (Higgins, 2006; Barree et al., 2009; Almarzooq et al., 2014). En règle générale, pour une formation relativement homogène, les valeurs de v dynamiques calculées en laboratoire ou dérivées des diagraphies sont proches des valeurs statiques déterminées en laboratoire. À l'inverse, les valeurs de E dynamiques calculées en laboratoire ou dérivées des diagraphies sont en général significativement plus élevées que les valeurs statiques déterminées en laboratoire (Morales et Marcinew, 1993; Barree et al., 2009).

Le calage des diagraphies à partir d'une carotte tronquée dont la partie manquante est compensée par un coulis s'accompagne de difficultés nouvelles parce qu'on introduit alors une hétérogénéité importante dans l'échantillon puisque les propriétés du coulis sélectionné ne sont pas identiques à celles de la roche, et parce que le matériau testé est alors affecté d'une double anisotropie, soit celle naturelle, qui correspond au litage et à la composition de la roche et celle anthropique, souvent perpendiculaire à la première, qui correspond à la surface d'adhésion entre la roche et le coulis.

3. Intégration des données

3.1 Données disponibles

Les données de laboratoire disponibles ont été transmises par CanmetMINES et comprennent les résultats des tests statiques uniaxiaux et triaxiaux et les résultats des tests dynamiques pratiqués sur des carottes entières ou tronquées provenant du puits gazier A267 et prélevées dans le Shale d'Utica et le shale du Groupe de Lorraine, ainsi que sur des échantillons témoins de coulis de ciment et de gypse. Les informations relatives à ces analyses de laboratoire qui ont été considérées dans le cadre de la présente étude incluent :

- la nature de l'échantillon (shale, ciment, gypse, composite shale/ciment ou shale/gypse), la profondeur et l'unité stratigraphique de chaque échantillon (annexe 1);
- le mode de rupture observé lors des essais (annexe 2);

- les densités mesurées, les vitesses de propagation des ondes P et S mesurées, ainsi que les modules de Young et les coefficients de Poisson dynamiques calculés selon la norme ASTM 2845 (annexe 3);
- les résultats des essais statiques incluant les modules de Young et les coefficients de Poisson statiques déterminés expérimentalement selon la norme ASTM 7012 (annexe 4).

Les données diagraphiques disponibles comprennent les diagraphies brutes au format LAS enregistrées lors du forage du puits Talisman, Saint-Édouard No 1 (A267), et les paramètres géomécaniques dérivés des diagraphies acoustiques brutes et synthétiques pour ce puits (Séjourné, 2014). Deux autres puits pétroliers et gaziers ont également été considérés pour des fins statistiques, soient les puits Talisman, Leclercville No 1 (A266), et Talisman, Fortierville No 1 (A279) (Séjourné, 2014). Pour fins de comparaison, les diagraphies brutes au format LAS d'une série de puits peu profonds ont également été examinées. Ces puits, réalisés par la CGC-Québec dans la région d'étude, sont appelés ici « série F » (Bordeleau et al., 2015 ; Rivard et al., 2015).

3.2 Contrôle de qualité

Les essais mécaniques réalisés en laboratoire ont porté pour l'essentiel sur des carottes de shale tronquées, dont la partie manquante a été remplacée (compensée) par un coulis de ciment ou de gypse. Cette procédure n'est pas habituelle et les essais mécaniques pratiqués en laboratoire sont normalement réalisés sur des échantillons entiers : afin de s'assurer que la méthode retenue pour tester les échantillons tronqués était fiable et reproductible, il a été décidé de retirer de la base de données les résultats dont la qualité pouvait être questionnable (les critères sont définis au paragraphe suivant), de manière à limiter au maximum les incertitudes liées au protocole expérimental, afin de se concentrer sur l'analyse des résultats les plus fiables et sur leur signification. La figure 1 présente la compilation de l'ensemble des résultats non filtrés pour E (le module de Young) et ν (le coefficient de Poisson) obtenus en laboratoire. Ces résultats sont détaillés aux annexes 3 et 4.

Dans le cas des tests réalisés sur les coulis de ciment et de gypse purs (sans shale) qui servent de référence, certains échantillons ont été retirés de la banque de données en raison de la qualité questionnable du ciment (mûrissement inadéquat). Dans le cas des tests statiques triaxiaux, les résultats obtenus avec une pression de confinement de 30 MPa ont été retirés car cette pression s'est avérée trop élevée et entraînait la déformation plastique des éprouvettes. Les valeurs de ν inférieures à 0,0 ou supérieures à 0,5 ont également été retirées. L'échantillon présentant un ν dynamique négatif correspond à une carotte de shale pur (non compensée). Les échantillons présentant un ν statique supérieur à 0,5 correspondent tous à des carottes de shale compensées par un coulis de ciment ou de gypse. Des valeurs de ν statique supérieures à 0,5 peuvent être obtenues en laboratoire dans certaines conditions (Fjaer et al., 2005) mais ces résultats ne peuvent être utilisés pour caler les valeurs de ν dynamique, soit l'objectif principal de la démarche. Au total, ce sont près de 25 % des échantillons testés qui ont été rejetés.

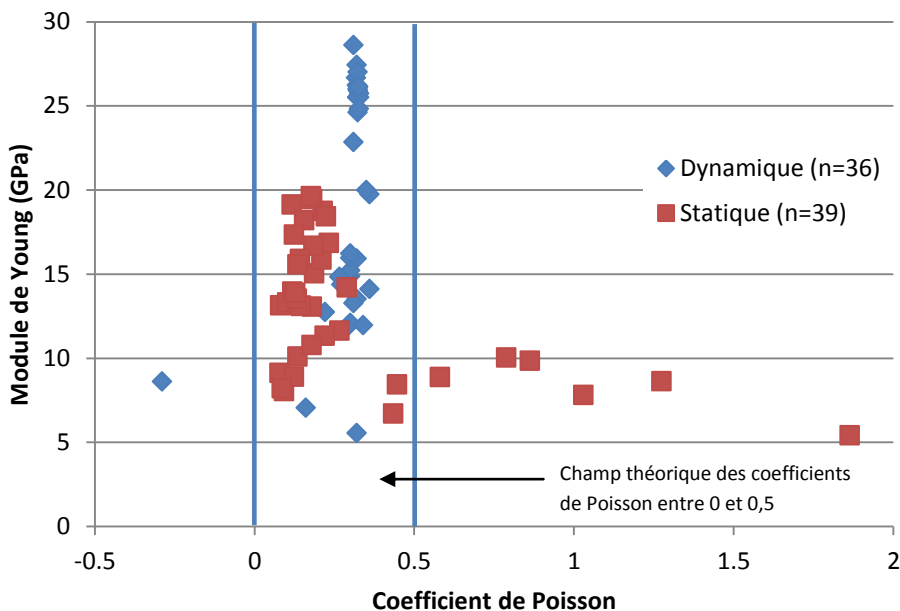


Figure 1 : Modules élastiques dynamiques et statiques pour l'ensemble de la banque de données (carottes de shale pur ou carottes compensées, coulis purs de ciment ou de gypse).

4. Analyse des propriétés des coulis

4.1 Observations

Les propriétés mécaniques des coulis purs ont été examinées dans un premier temps, de manière à isoler les possibles effets que la présence du coulis de ciment ou de gypse pouvait avoir sur l'analyse des carottes de shale compensées.

On observe une bonne corrélation entre les vitesses de propagation des ondes P et S (respectivement V_p et V_s), tant pour les coulis de gypse que pour ceux de ciment (figure 2). Cette relation était attendue et confirme la qualité et la reproductibilité des coulis purs utilisés. Même s'il existe une démarcation nette entre les vitesses de propagation des coulis de ciment et celles des coulis de gypse, ce qui traduit la différence dans les propriétés de ces matériaux, le rapport V_p/V_s demeure stable pour les deux types de coulis. Comme c'est ce rapport qui entre dans le calcul de v , le choix du type matériau – ciment ou gypse – ne devrait pas avoir d'incidence sur les valeurs de v dynamiques calculées pour ces échantillons témoins.

Le calcul de E fait appel au même rapport V_p/V_s ainsi qu'à V_s et à la densité du matériau. Les figures 3 et 4 illustrent la relation entre V_p ou V_s et la densité des coulis. On observe une relation générale qualitative entre la densité et les vitesses en comparant des matériaux aux densités contrastées. Ainsi le ciment, plus dense, est caractérisé par des vitesses plus élevées autant pour V_p que pour V_s . Il existe en revanche une dispersion appréciable dans les vitesses mesurées pour un matériau donné et il n'est pas

possible d'établir une corrélation simple entre la vitesse et la densité du matériau : la densité n'est pas le seul facteur qui influence les vitesses mesurées en laboratoire.

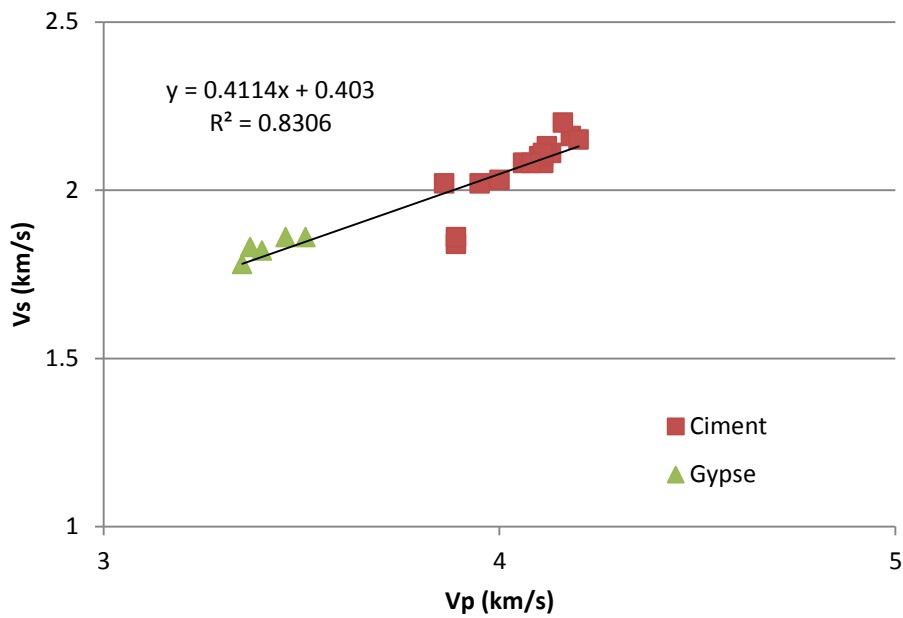


Figure 2 : Vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour les coulis de ciment et de gypse.

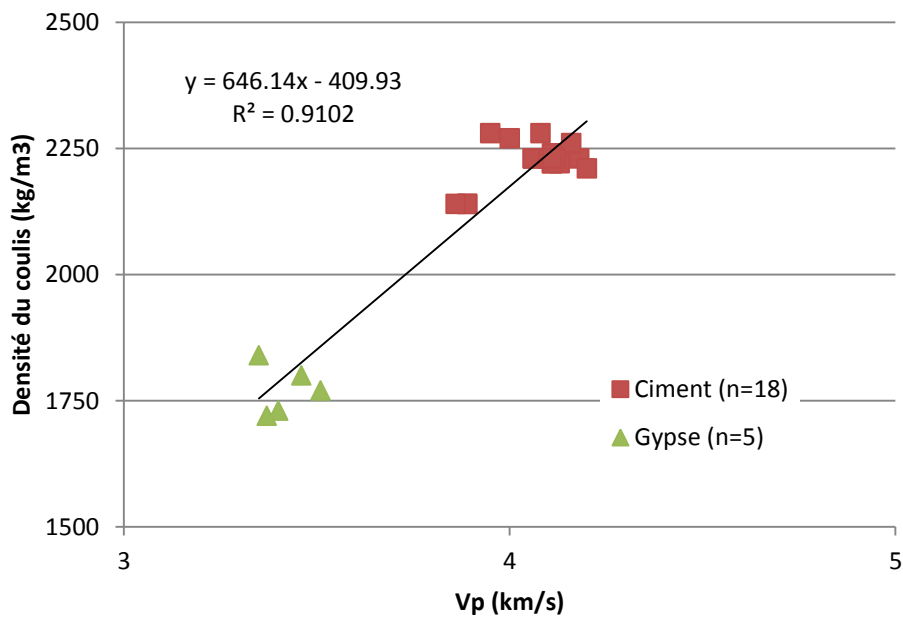


Figure 3 : Vitesses de propagation des ondes P mesurées pour les coulis de ciment ou de gypse, comparées à la densité des coulis.

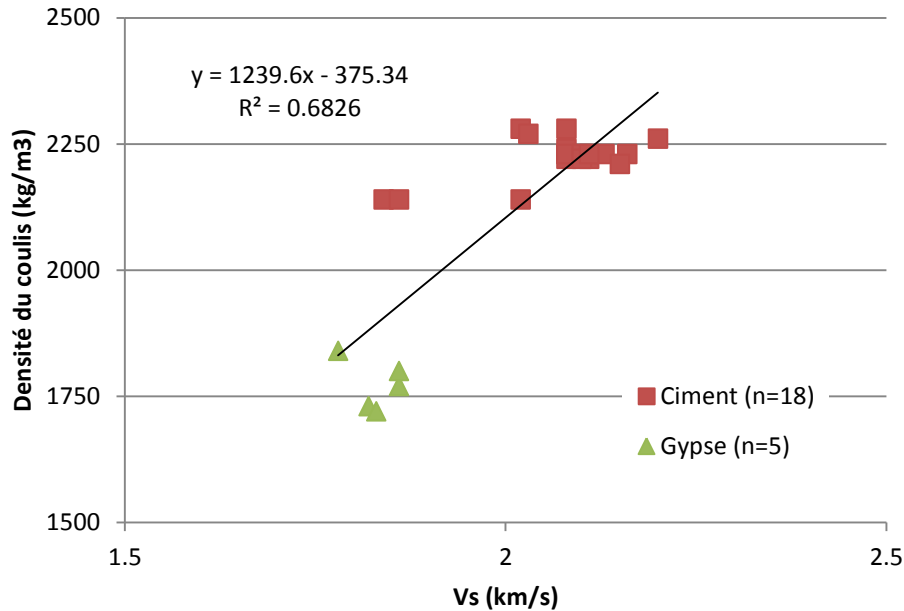


Figure 4 : Vitesses de propagation des ondes S mesurées pour les coulis de ciment ou de gypse, comparées à la densité des coulis.

La figure 5 permet de comparer E et ν selon la nature du coulis (ciment ou gypse) et selon le type de mesure de ces propriétés élastiques (mesure statique ou dynamique). La variabilité des valeurs de E dynamiques est modérée et comparable à celle des valeurs statiques. Dans le cas du ciment, les valeurs dynamiques et statiques de E sont contrastées comme c'est généralement le cas dans la littérature, tandis qu'elles sont comparables dans le cas du gypse, ce qui est inattendu (Barree et al., 2009). La variabilité des valeurs de ν dynamiques est faible, mais contraste avec la variabilité importante des valeurs de ν statiques. Ce contraste est net pour le ciment, moins prononcé pour le gypse bien que ceci puisse être dû à un biais statistique car très peu d'échantillons étaient disponibles pour le gypse. Ce phénomène pour les valeurs de ν se démarque sensiblement des résultats attendus, les ν statiques et dynamiques étant généralement très comparables (voir section 2.2 et Barree et al., 2009) alors que pour les échantillons analysés ici les valeurs dynamiques sont pratiquement le double des valeurs statiques.

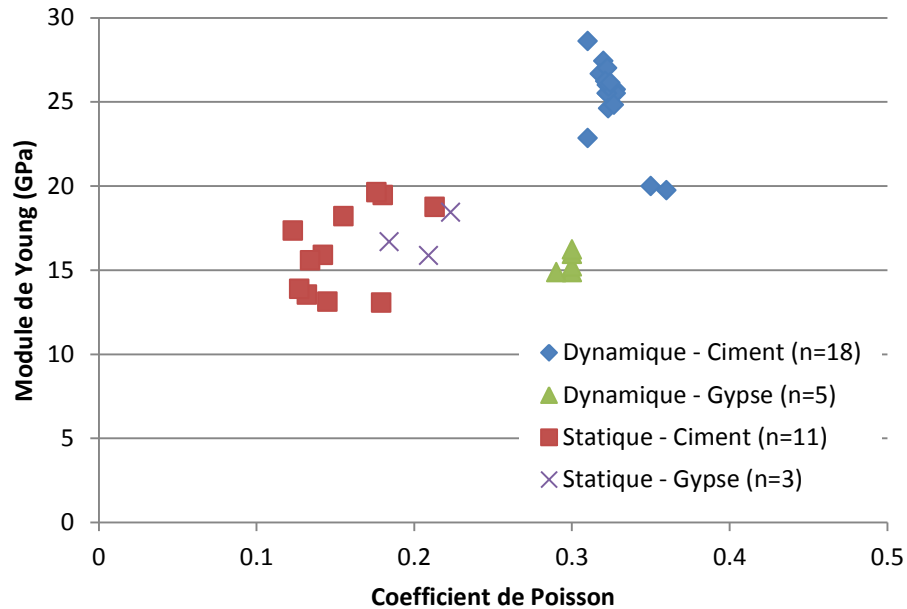


Figure 5 : Comparaison des modules élastiques dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse.

Les figures 6 et 7 présentent le même jeu de données qu'à la figure 5, contrasté cette fois selon la densité du coulis mesurée en laboratoire. Pour le coulis de ciment (densité élevée), les valeurs statiques et dynamiques de ν et de E sont contrastées. Une divergence était attendue entre les valeurs statiques et dynamiques pour E mais pas pour ν . Pour le coulis de gypse (densité faible), les valeurs statiques et dynamiques de ν sont contrastées mais pas celles de E . C'est la relation inverse qui devrait être observée en théorie, soit une variation marquée de E mais faible de ν .

Les figures 8 et 9 permettent de comparer E ou ν statiques et dynamiques pour le ciment et le gypse. Dans le cas de E (figure 8), il pourrait y avoir une corrélation faible entre les valeurs statiques et dynamiques pour le gypse, aucune pour le ciment. Dans le cas de ν (figure 9) il n'y a aucune corrélation, seulement un étalement des valeurs statiques quelles que soient les valeurs dynamiques pour le même échantillon. Ces observations sont moins diagnostiques dans le cas du gypse à cause du manque de données statistiques.

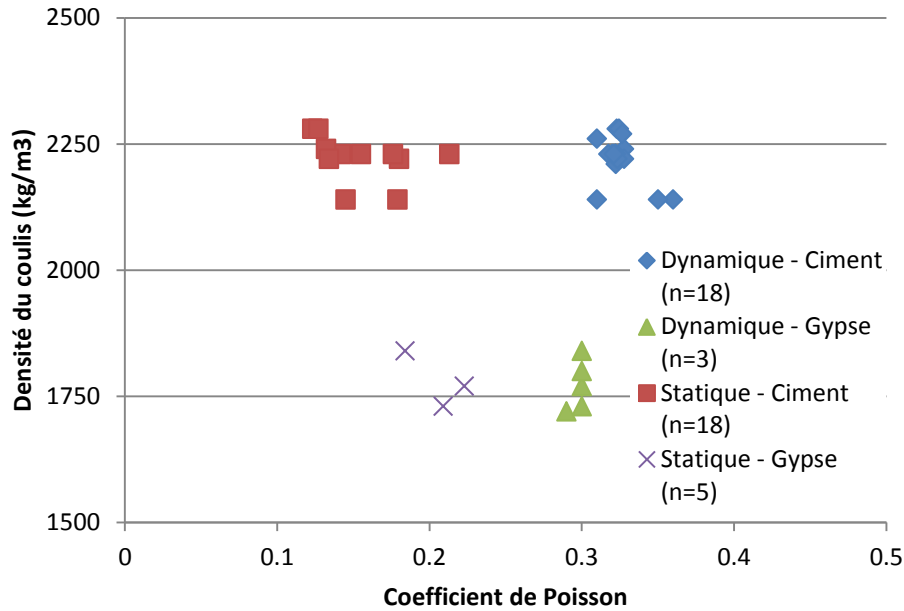


Figure 6 : Comparaison des coefficients de Poisson dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse avec la densité des coulis.

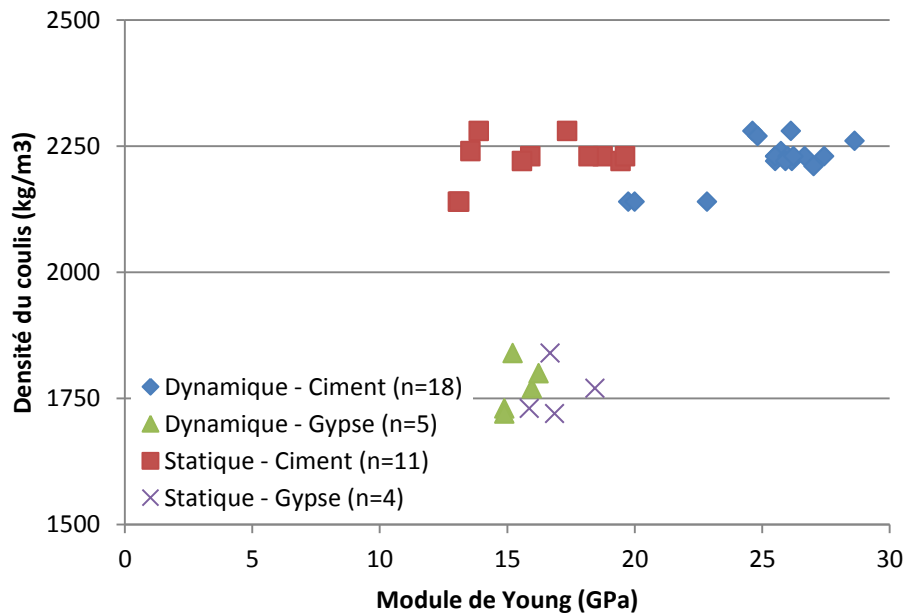


Figure 7 : Comparaison des modules de Young dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse avec la densité des coulis.

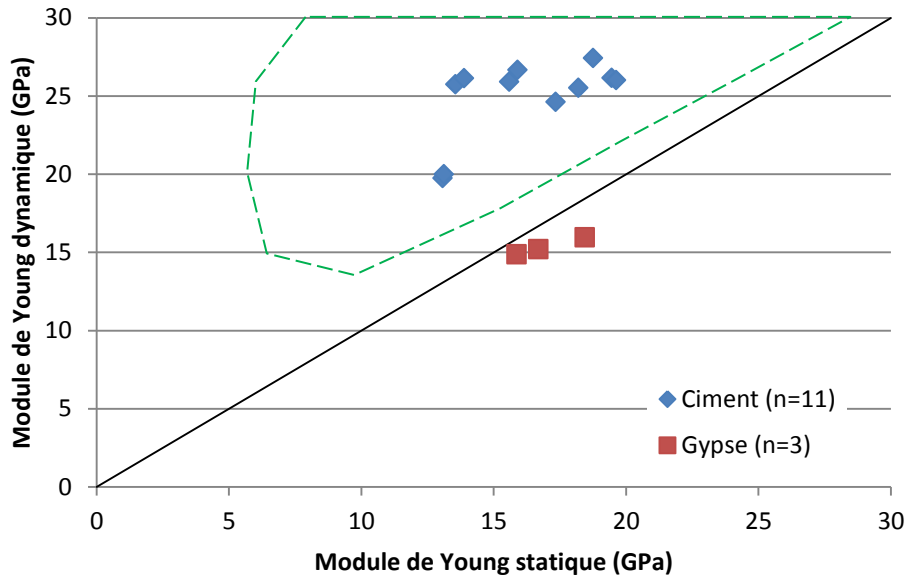


Figure 8 : Comparaison des modules de Young dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse.

L'aire en pointillés correspond au champ des modules de Young dynamiques et statiques compilés dans Barree et al. (2009), avec des valeurs plus élevées pour les modules dynamiques que pour les modules statiques correspondants.

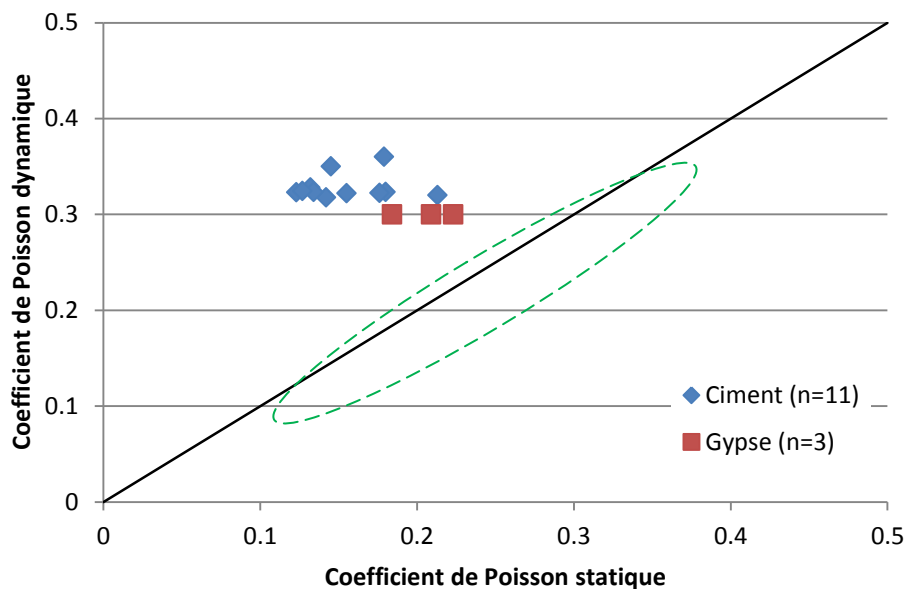


Figure 9 : Comparaison des coefficients de Poisson dynamiques et statiques calculés pour les coulis de ciment et de gypse.

L'aire en pointillés verts correspond au champ des coefficients de Poisson dynamiques et statiques compilés dans Barree et al. (2009), avec des valeurs statiques égales à environ 95% des valeurs dynamiques correspondantes.

4.2 Synthèse

L'analyse des propriétés mécaniques mesurées en laboratoire pour les coulis qui sont utilisés pour compenser les carottes de shale tronquées met en lumière les différences de valeurs obtenues en fonction du test utilisé et l'absence de corrélation entre les résultats des tests dynamiques et statiques pour les coulis.

En particulier, v dynamique est relativement homogène pour un matériau donné (ciment ou gypse), mais v statique montre une grande variabilité qui ne semble correspondre à aucune tendance. On observe plutôt un étalement du nuage de points sur les figures précédentes, malgré le nombre limité d'échantillons disponibles. Les valeurs de v dynamiques et statiques sont très contrastées pour un matériau donné, une observation qui se démarque sensiblement du résultat théorique attendu (voir section 2.2 et Barree et al., 2009).

E a un comportement moins erratique. E dynamique n'est pas homogène mais il est peu variable et E statique est variable mais de façon moins prononcée que v . Les valeurs dynamiques et statiques de E sont peu contrastées pour le gypse mais elles le sont dans le cas du ciment. Dans la pratique, la différence entre les valeurs de E statiques et dynamiques peuvent varier du simple au double (Barree et al., 2009).

Enfin, la forte variabilité observée dans les valeurs statiques de v (étalement des valeurs), de même que pour E dans une moindre mesure, pose le problème de la stabilité et de la reproductibilité du matériau utilisé pour compenser les carottes de shale.

Il apparaît donc que les propriétés mécaniques des coulis sélectionnés pour compenser les carottes de shale, en particulier l'apparente variabilité naturelle de ces propriétés, risque de biaiser les propriétés mécaniques mesurées pour le shale.

Ces observations ont des conséquences sur la validité et la signification des tests réalisés sur les échantillons de shale compensés par du ciment ou du gypse. Dans l'ensemble, il apparaît que les résultats des tests dynamiques réalisés sur les coulis purs peuvent être considérés comme fiables et reproductibles, tandis que les résultats des tests statiques apparaissent en général incohérents en regard des résultats théoriques qualitatifs attendus, particulièrement dans le cas de v .

La divergence observée entre les résultats d'analyse de laboratoire et la théorie pour les tests statiques réalisés sur les coulis ne doit pas être considérée comme une raison suffisante pour rejeter les résultats des tests statiques. L'analyse des résultats des tests effectués sur les carottes compensées est donc présentée dans la section suivante mais cette analyse est accompagnée de **fortes mises en garde quant à la validité des résultats exposés et à la pertinence des interprétations proposées**, jusqu'à ce que les résultats obtenus sur les coulis purs présentés dans la présente section aient pu être expliqués.

5. Tests statiques sur les shales

5.1 Observations

La figure 10 présente la synthèse filtrée (voir section 3.2) des tests uniaxiaux et triaxiaux réalisés sur les carottes de shale compensées. Comme dans le cas des coulis purs, les valeurs de E présentent un étalement de 10 GPa environ tandis qu'on observe un étalement important des valeurs de ν , qui couvrent la presque totalité du spectre de valeurs possibles pour ν , soit de 0 à 0,5. Cet étalement ne paraît pas lié à la nature des unités échantillonnées, soit le Groupe de Lorraine et le Shale d'Utica.

L'étalement des valeurs de ν ne paraît pas non plus tributaire de la nature du coulis (ciment ou gypse) ou de la nature du test effectué (uniaxial ou triaxial), ainsi que le révèlent les figures 11 et 12.

Dans le cas des tests triaxiaux, la pression de confinement ne paraît pas davantage exercer une influence significative sur les propriétés mécaniques bien que l'on note une plus grande variabilité dans les valeurs de E et de ν lorsque la pression de confinement est faible (figures 13 et 14). Fait notable, des essais réalisés avec une pression de confinement de 30 MPa se sont traduits par une déformation plastique des échantillons et rendant les mesures impossibles.

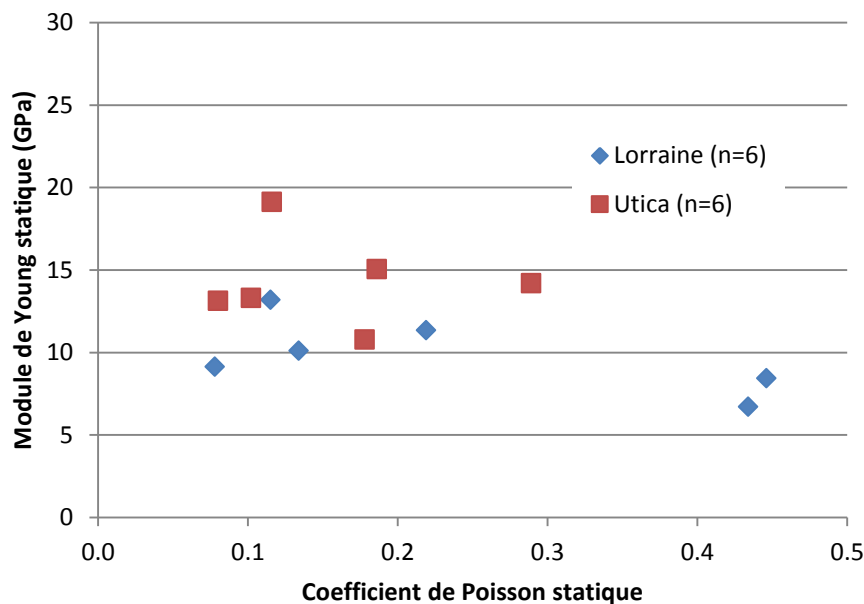


Figure 10 : Comparaison des modules élastiques statiques calculés pour les échantillons du Groupe de Lorraine et du Shale d'Utica.

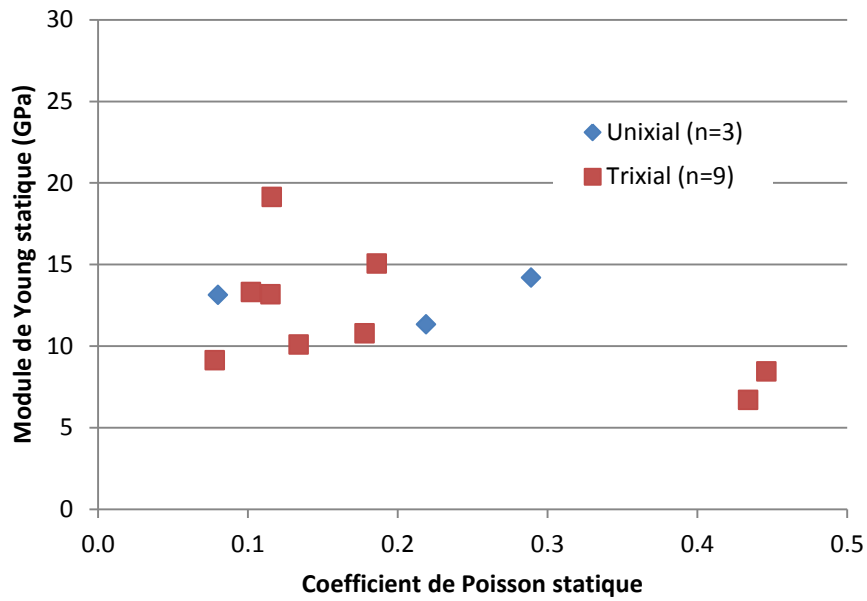


Figure 11 : Comparaison des modules élastiques statiques calculés selon la nature du test, compression uniaxiale ou triaxiale.

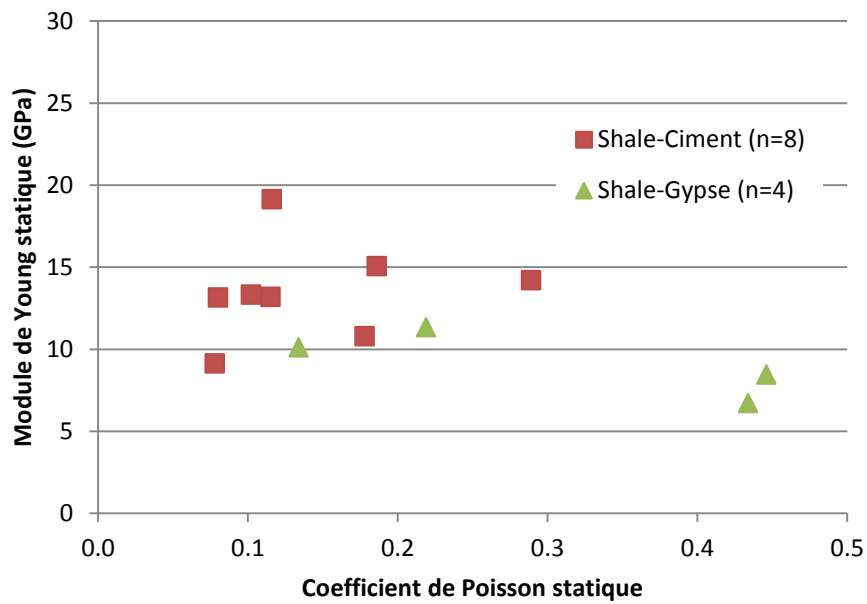


Figure 12 : Comparaison des modules élastiques statiques calculés selon la nature du coulis utilisé pour compenser la carotte.

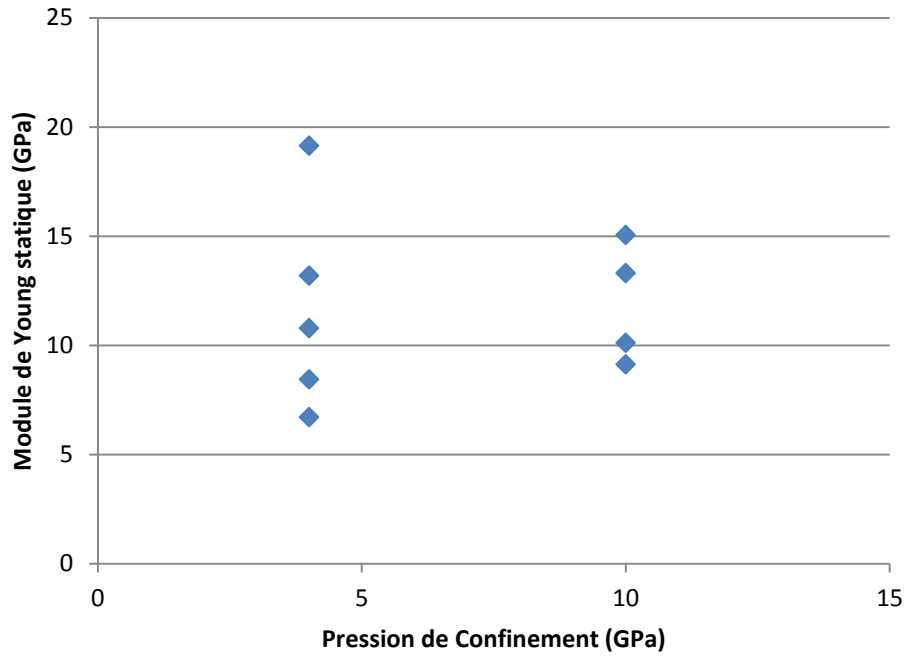


Figure 13 : Étalement des valeurs des modules de Young en fonction de la pression de confinement (9 échantillons).

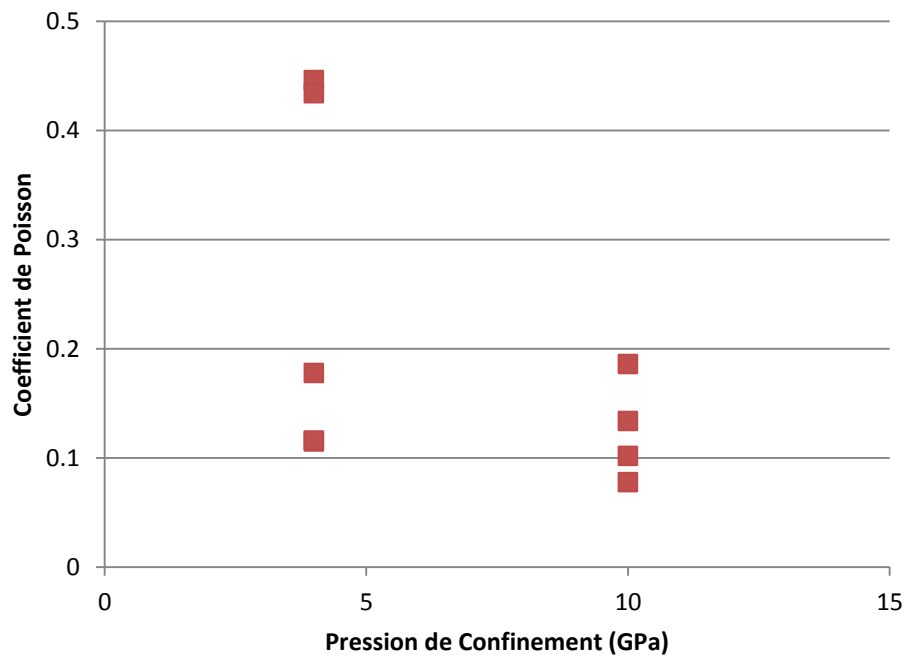


Figure 14 : Étalement des valeurs des coefficients de Poisson en fonction de la pression de confinement (10 échantillons).

5.2 Synthèse

La variabilité et l'étalement des valeurs de v (et de E dans une moindre mesure) calculées à partir des tests statiques réalisés sur les carottes compensées fait écho à la variabilité intrinsèque mise en lumière précédemment dans le cas des coulis purs. Il n'est pas possible de déterminer si la variabilité des valeurs de v et de E observée pour les carottes compensées est influencée ou contrôlée par la variabilité des v et des E des coulis, ni si elle est influencée en totalité ou en partie par le protocole expérimental retenu.

En particulier le spectre des valeurs de v est très étendu pour les carottes de shales bien que le shale lui-même soit relativement homogène d'après les descriptions lithologiques (Rota, 2009) et les enregistrements diagraphiques du puits A267 (Séjourné, 2014) pour les intervalles concernés. Le shale présente une variabilité lithologique naturelle avec des proportions variables d'argile, de silice et de calcaire, mais ces proportions varient mais à l'intérieur d'une fourchette de valeurs limitée : on ne compare pas ici des échantillons de shale à des échantillons de grès ou de calcaire. Il faut aussi tenir compte du fait que les shales ne se comportent pas comme un matériau élastique, mais ce point ne devrait pas conférer aux shales des propriétés mécaniques sensiblement différentes de celles des coulis utilisés. En tout état de cause, la raison de la variabilité des témoins (coulis purs) devrait être élucidée préalablement à la poursuite de l'analyse des propriétés statiques des carottes compensées afin de limiter le nombre de facteurs qui peuvent affecter les résultats.

6. Tests dynamiques sur les shales

6.1 Observations

Les résultats des tests dynamiques réalisés sur les carottes compensées sont dans l'ensemble plus homogènes et plus cohérents que les résultats des tests statiques présentés à la section 5.1. On observe ainsi une bonne corrélation entre les vitesses des ondes P et S (figure 15), comme c'était le cas pour les coulis purs (figure 2).

Les figures 16 et 17 présentent le même jeu de données qu'à la figure 15, cette fois-ci contrasté selon l'intervalle stratigraphique considéré et selon la nature du coulis utilisé. La distinction entre les échantillons du Shale d'Utica et ceux du Groupe de Lorraine ne semble pas influencer la tendance générale, mais il existe un biais statistique évident pour le Shale d'Utica qui n'est représenté que par un seul point de donnée (figure 16). La distinction entre les échantillons de shale purs non compensés (trois échantillons) et ceux compensés avec un coulis de ciment ou de gypse ne paraît pas non plus être un critère de distinction significatif (figure 17).

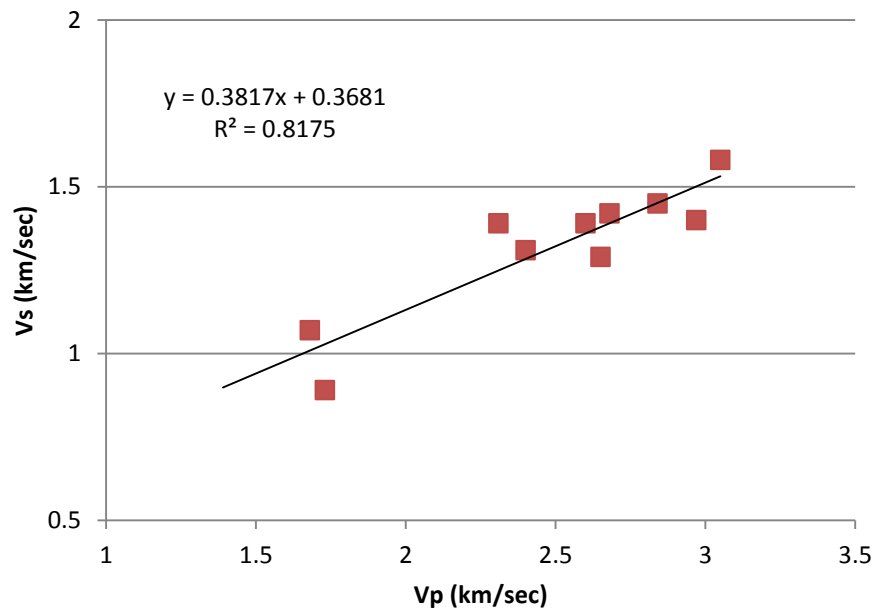


Figure 15 : Vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour l'ensemble des carottes de shale pur et compensées (10 échantillons).

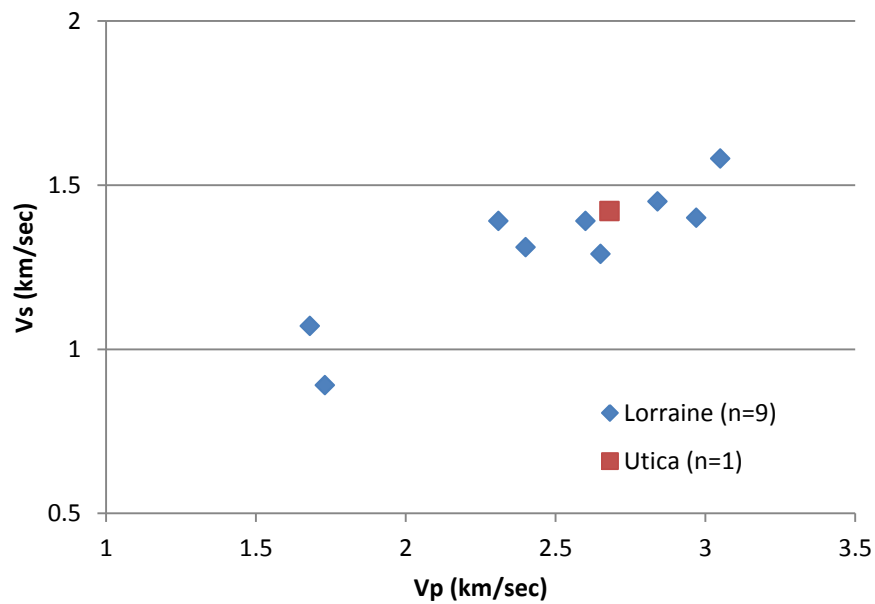


Figure 16 : Comparaison des vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour l'ensemble des carottes de shale pur et compensées pour les échantillons du Groupe de Lorraine et du Shale d'Utica.

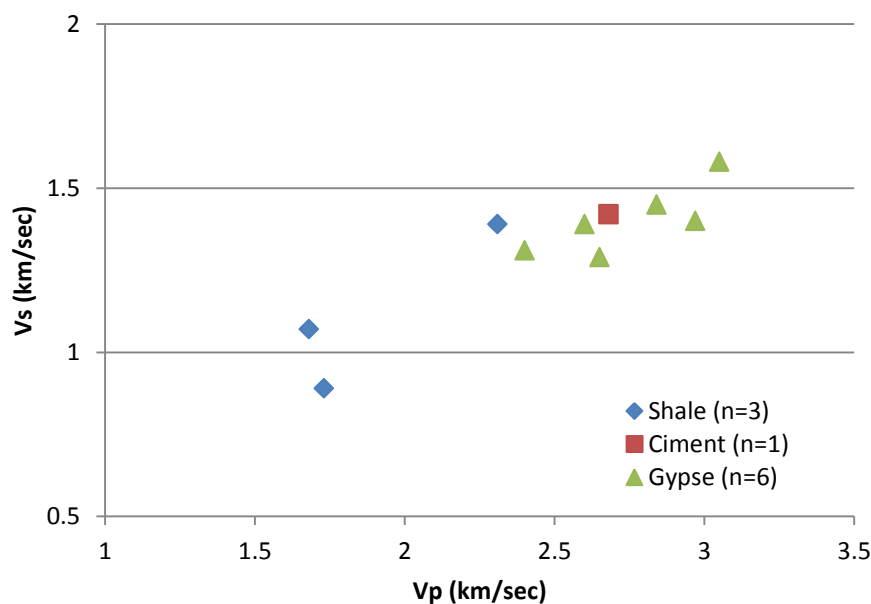


Figure 17 : Comparaison des vitesses de propagation des ondes P et S mesurées pour les échantillons de shale pur ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse.

L'ensemble des mesures filtrées des V_p est représenté graphiquement à la figure 18, dans laquelle ce paramètre est rapporté à la densité du shale (densité mesurée avant compensation de l'échantillon). Cette figure révèle que les V_p des carottes compensées avec du ciment présentent une plus grande variabilité que les V_p des carottes de shale pur ou compensées avec du gypse. Les valeurs des V_p des carottes de shale pur et des carottes compensées avec du ciment sont comparables bien que largement étalées, et se distinguent des V_p des carottes compensées avec du gypse (figure 19), l'étalement des valeurs de V_p des carottes compensées avec du ciment étant le double de l'étalement des valeurs de V_p des carottes compensées avec du gypse. Cette observation est à mettre en opposition avec la figure 3, qui montre à l'inverse que les V_p du ciment pur sont plus élevées que les V_p du gypse pur : la nature du coulis ne semble donc pas exercer d'influence significative sur les V_p des carottes compensées.

L'ensemble des mesures filtrées des V_s est représenté graphiquement à la figure 20, dans laquelle ce paramètre est rapporté à la densité du shale (densité mesurée avant compensation de l'échantillon). Cette figure révèle une variabilité des V_s des carottes compensées avec du gypse plus faible que celle des V_s des carottes de shale non compensées. Les V_s des trois ensembles – incluant un échantillon unique non représentatif compensé avec un coulis de ciment – paraissent indépendantes de la densité du shale. De même que pour les V_p (figure 19), les V_s des carottes de shale pur se distinguent des V_s des carottes compensées avec du gypse (figure 21). La dispersion des valeurs est toutefois moindre pour les V_s que pour les V_p .

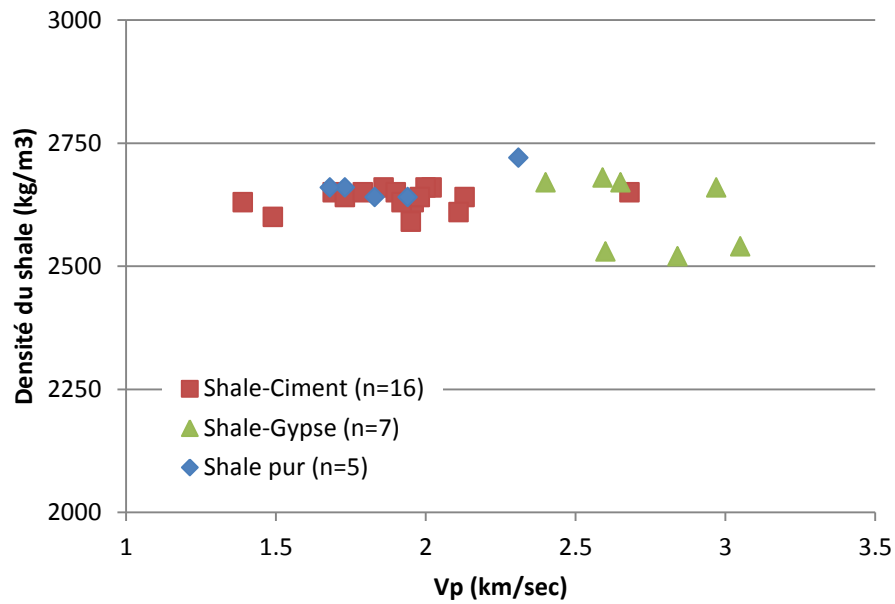


Figure 18 : Variation des vitesses de propagation des ondes P mesurées pour les échantillons de shale pur ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse, en fonction de la densité du shale.

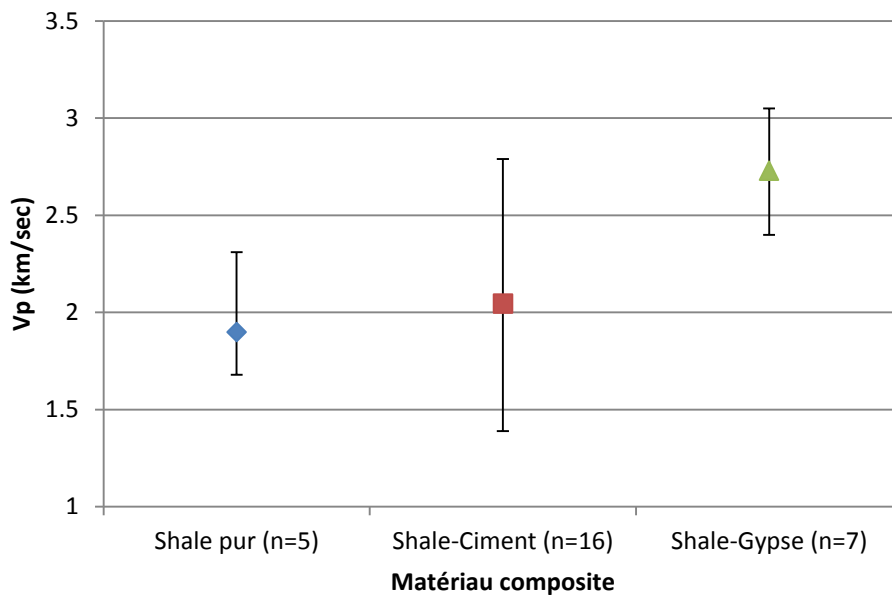


Figure 19 : Étalement des vitesses de propagation de l'onde P mesurée en fonction de la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).

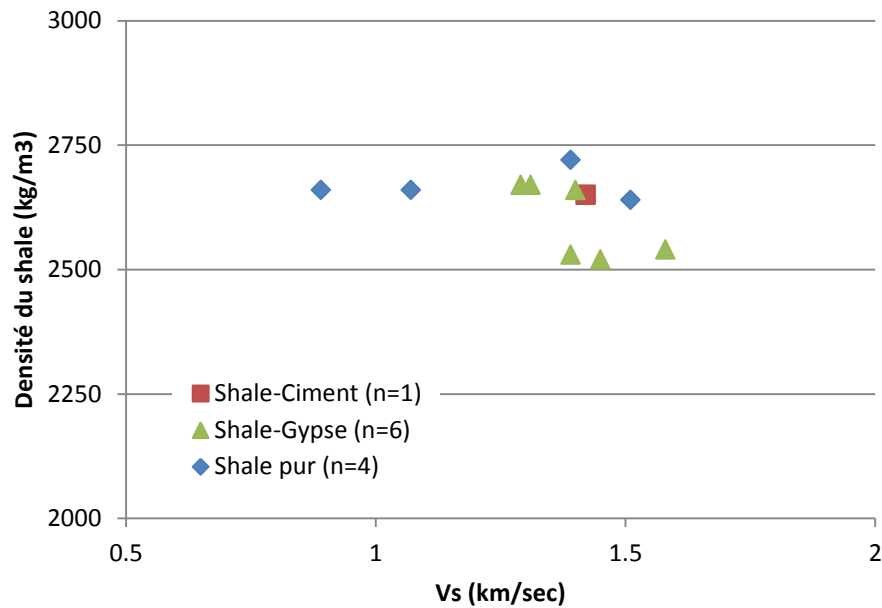


Figure 20 : Variation des vitesses de propagation des ondes S mesurées pour les échantillons de shale pur ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse, en fonction de la densité du shale.

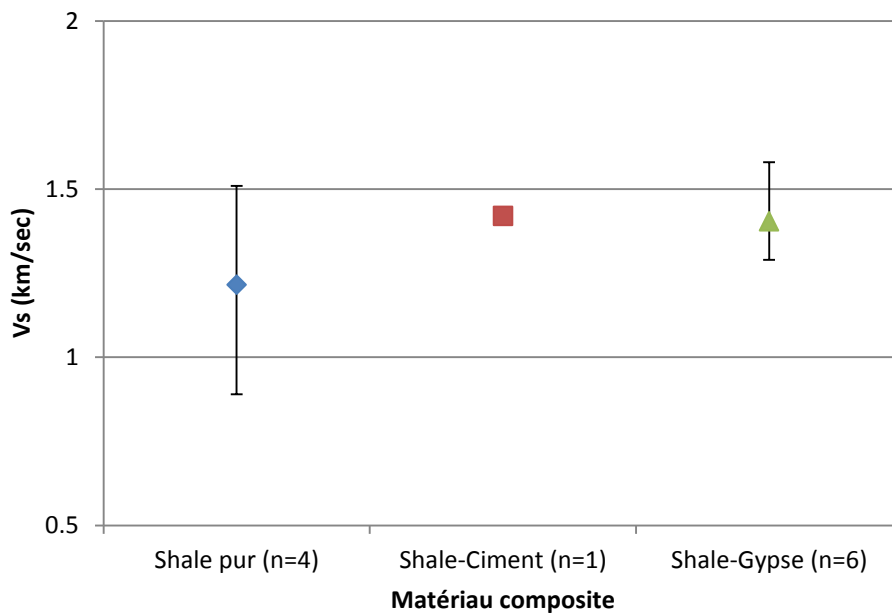


Figure 21 : Étalement des vitesses de propagation de l'onde S mesurée en fonction de la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).

Les modules élastiques dynamiques (ν et E) dérivés des valeurs mesurées de V_p et V_s et de la densité du shale sont présentés graphiquement à la figure 22. La nature des échantillons (shale pur ou compensé par du gypse) semble influencer les E et ν dynamiques, mais il s'agit vraisemblablement d'un biais

statistique car les figures précédentes montrent au contraire que la compensation n'a pas d'incidence significative sur les valeurs de V_p et de V_s dont E et ν sont dérivés. Il n'est pas possible de déterminer si la stratigraphie a une influence sur les E et ν calculés. L'unique échantillon disponible pour le Shale d'Utica présente des propriétés comparables à celles du Groupe de Lorraine (figure 23) mais les données statistiques sont insuffisantes pour permettre un diagnostic.

On note une bonne corrélation entre E dynamique et V_p ou V_s (figure 24). Dans le cas de ν dynamique en revanche, la corrélation est médiocre avec V_p et nulle avec V_s (figure 25). Ces observations font écho à celles réalisées précédemment pour les coulis purs (figure 2), ce qui souligne la cohérence des données dynamiques obtenues quelle que soit la nature du matériau.

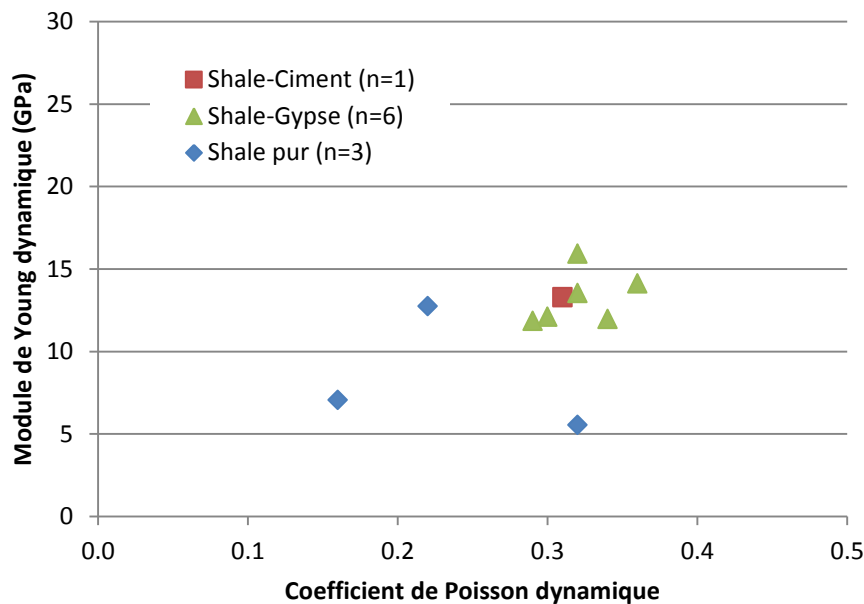


Figure 22 : Comparaison des modules élastiques dynamiques en fonction de la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).

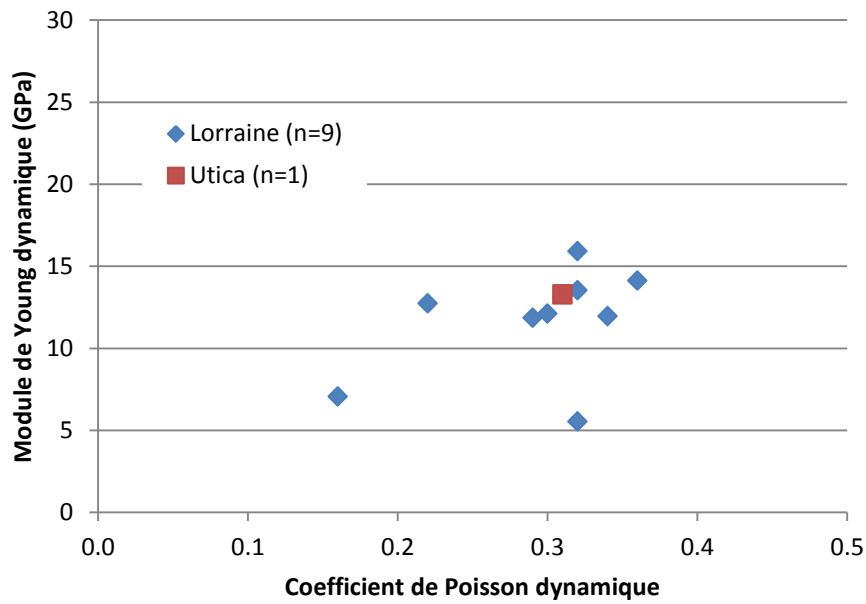


Figure 23 : Comparaison des modules élastiques dynamiques pour les échantillons du Groupe de Lorraine et du Shale d'Utica.

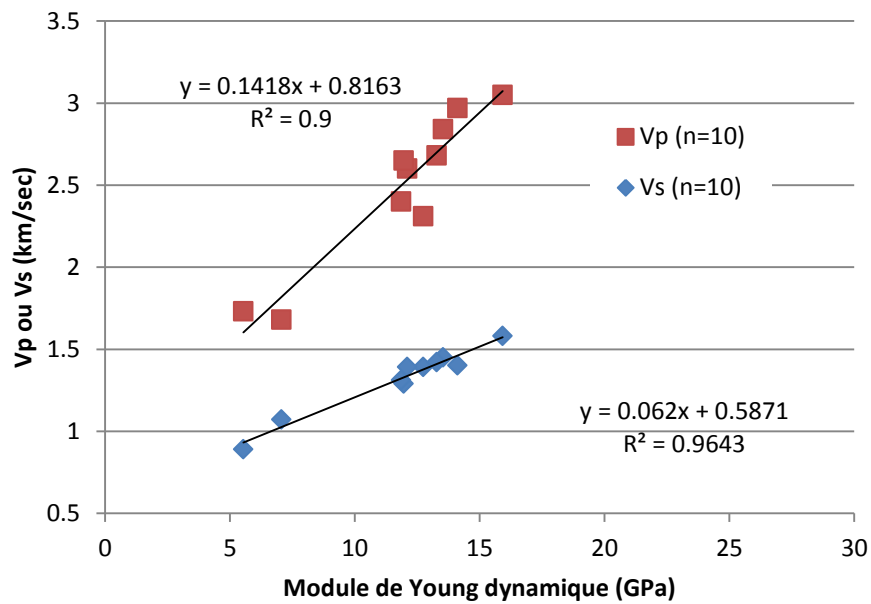


Figure 24 : Corrélation entre le module de Young dynamique calculé et la vitesse de propagation mesurée de l'onde P et de l'onde S.

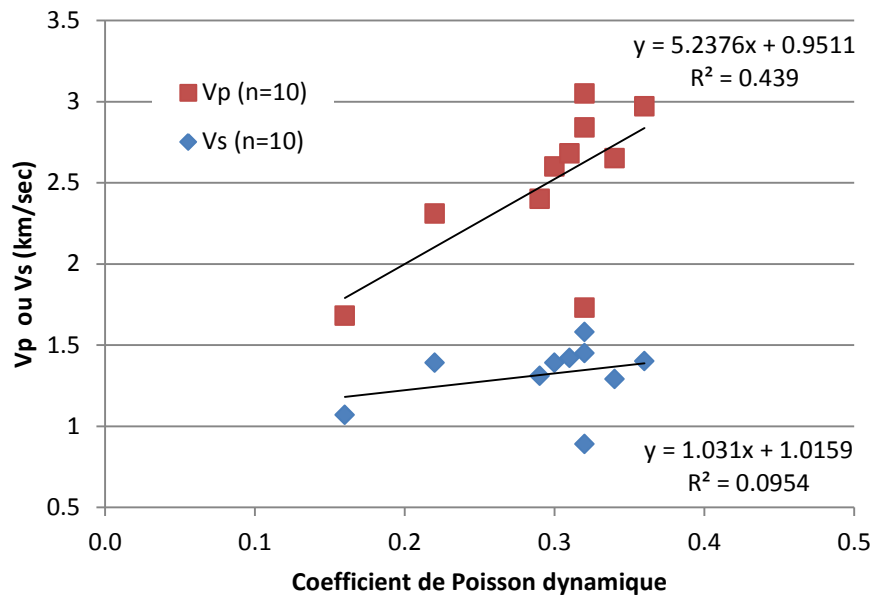


Figure 25 : Corrélation entre le coefficient de Poisson dynamique calculé et la vitesse de propagation mesurée de l'onde P et de l'onde S.

6.2 Synthèse

La nature du matériau, qu'il s'agisse d'échantillons de shales purs ou compensés par un coulis de ciment ou de gypse, ou qu'il s'agisse d'un coulis pur de ciment ou de gypse, ne semble pas affecter significativement les mesures de V_p et V_s . Les valeurs de v et E dérivées de V_p et V_s présentent une certaine variabilité qui est difficile à expliquer pour le moment mais qui paraît acceptable pour le moment compte tenu de la faible population statistique disponible. Dans l'ensemble, les résultats des tests dynamiques semblent cohérents et recevables même si une population statistique plus importante aurait été souhaitable.

Selon le temps disponible et la disponibilité des échantillons, l'analyse des propriétés dynamiques pourrait être complétée en caractérisant l'anisotropie des carottes de shale par des tests acoustiques réalisés selon différentes orientations par rapport à l'axe long de la carotte. Dans la mesure du possible, il serait également souhaitable de comparer ces résultats entre une carotte de shale pur et une carotte compensée.

7. Comparaison des résultats statiques et dynamiques

7.1 Observations

Les observations précédentes ont souligné l'importante variabilité des valeurs de ν statiques qui couvrent la presque totalité du champ de valeurs possibles, soit entre 0 et 0,5. La variabilité des valeurs de ν dynamiques et de E statiques et dynamiques demeure par ailleurs acceptable compte tenu de la faible population statistique disponible. Les valeurs statiques et dynamiques sont à présent comparées dans les figures suivantes.

Une fois les données filtrées pour ne conserver que les échantillons pour lesquels des résultats statiques et dynamiques sont disponibles, la population statistique pour les valeurs de ν est significativement réduite, mais la variabilité demeure et aucune corrélation ne peut être identifiée (figure 26). Les valeurs statiques et dynamiques de E ne présentent pas non plus de corrélation satisfaisante (figure 27).

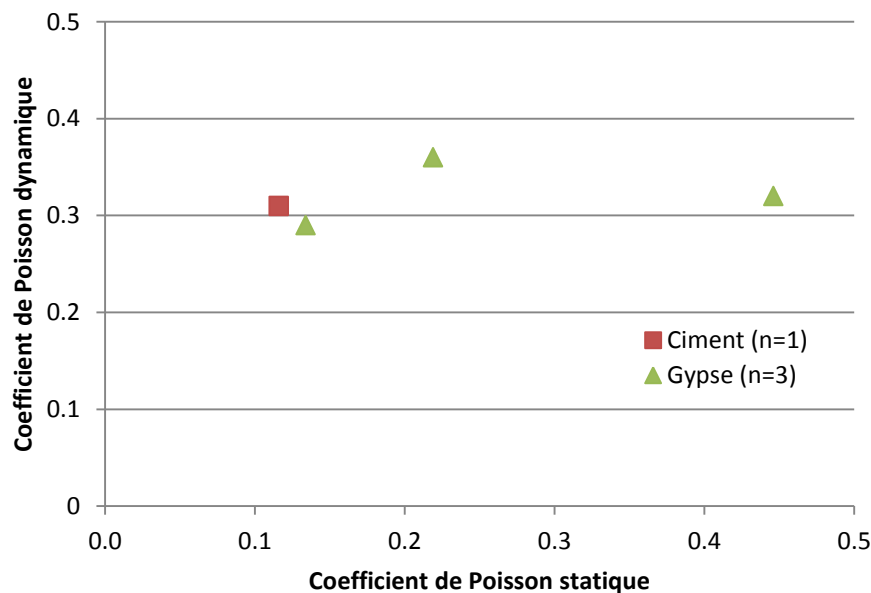


Figure 26 : Comparaison entre les valeurs des coefficients de Poisson dynamiques et statiques selon la nature du matériau testé (échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).

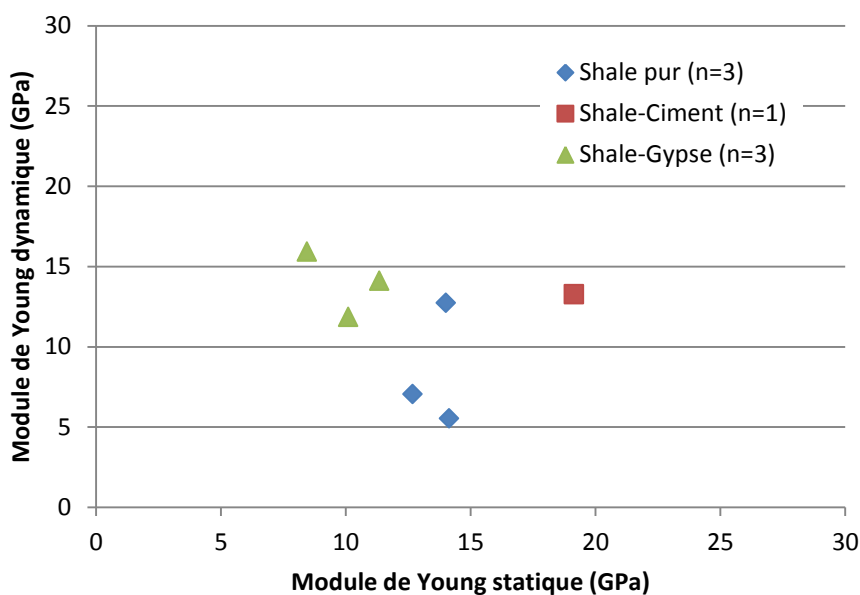


Figure 27 : Comparaison entre les valeurs des modules de Young dynamiques et statiques selon la nature du matériau testé (shale pur ou échantillon compensé par un coulis de ciment ou de gypse).

7.2 Synthèse

Sur la base des données disponibles, il n'est pas possible d'établir une corrélation entre les résultats des tests statiques et dynamiques pratiqués sur les échantillons de shales purs ou compensés. **Le calage des données dynamiques dérivées des diagraphies n'apparaît pas réalisable pour le moment**, en raison de la faiblesse statistique des populations disponibles (section 7.1) et surtout en raison de l'incohérence observée dans les valeurs de v statiques (section 5.2). La cohérence des données dynamiques de laboratoire (section 6.2) autorise toutefois la comparaison entre celles-ci et les diagraphies acoustiques et mécaniques des forages (section 8).

8. Comparaison avec les diagraphies

8.1 Observations

Les valeurs de V_p et V_s ont été extraites des diagraphies du puits A267 pour les intervalles correspondants aux carottes analysées en laboratoire (figure 28).

Les valeurs rapportées ici pour les diagraphies correspondent à une moyenne calculée sur un intervalle de 15,24 cm. Compte tenu de l'hétérogénéité verticale des shales, la résolution verticale des diagraphies est donc plus faible que celle des tests pratiqués sur les carottes. En dépit de cette imprécision, on observe une bonne corrélation entre les V_p et V_s dérivées des diagraphies et celles mesurées en laboratoire à partir des carottes. Le rapport V_p/V_s moyen estimé est de 1,73 pour les diagraphies et de 1,88 pour les carottes. La différence observée dans les valeurs absolues entre les V_p et V_s mesurées en laboratoire et par les diagraphies s'explique par des conditions environnementales de mesure

différentes, en particulier la pression à laquelle les échantillons et la roche sont soumis, la saturation en fluides dans le cas des diagraphies ou au contraire le drainage des échantillons dans le cas des échantillons de laboratoire, ainsi que la température.

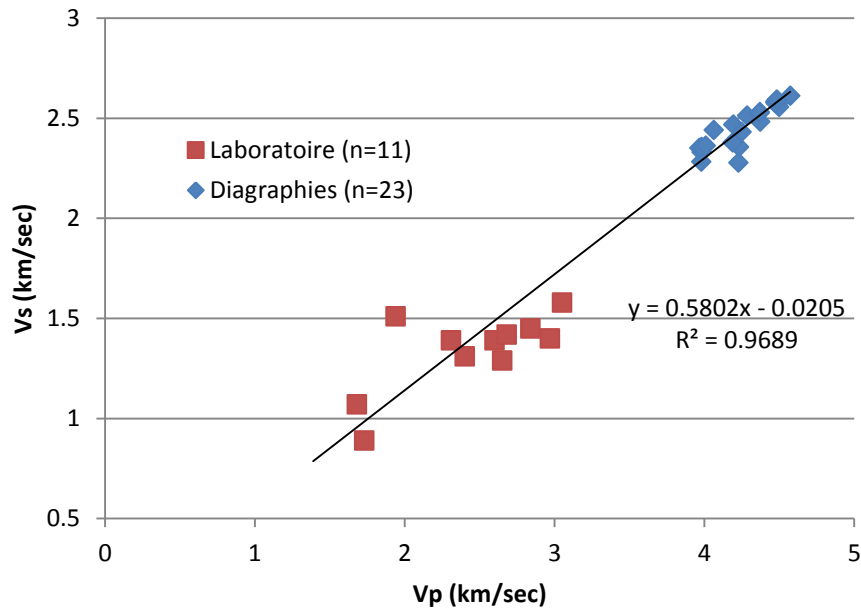


Figure 28 : Corrélation entre les vitesses de propagation des ondes P et S mesurées en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et en diagraphies (puits gazier A267).

Les modules élastiques dynamiques calculés à partir des Vp et Vs des diagraphies et en laboratoire sont présentés graphiquement à la figure 29. Les valeurs de E issues des diagraphies sont environ quatre fois plus élevées que celles obtenues à partir des données de laboratoire, tandis que celles de ν sont en moyenne assez semblables. La figure montre que l'étalement des valeurs de ν dynamiques calculées à partir des carottes est plus important que l'étalement des valeurs calculées à partir des diagraphies pour les mêmes intervalles si l'on considère l'ensemble des données disponibles. Deux échantillons se démarquent toutefois par de faibles valeurs de ν et si ces échantillons sont exclus, alors l'étalement des valeurs de ν dynamiques calculées à partir des carottes et des diagraphies devient comparable et peut être considéré comme reflétant la variabilité naturelle du matériau. Il n'y a toutefois pas lieu d'exclure les deux échantillons en question, leurs propriétés étant comparables à celles des autres échantillons. On note toutefois un décalage entre les valeurs des ν dynamiques calculés à partir des carottes et les valeurs des ν dynamiques calculés à partir des diagraphies. Les valeurs absolues de E dynamiques calculées à partir des carottes sont aussi significativement plus basses que celles dérivées des diagraphies pour les mêmes intervalles. Contrairement aux valeurs de ν cependant, l'étalement des valeurs de E est comparable pour les données issues des carottes et des diagraphies.

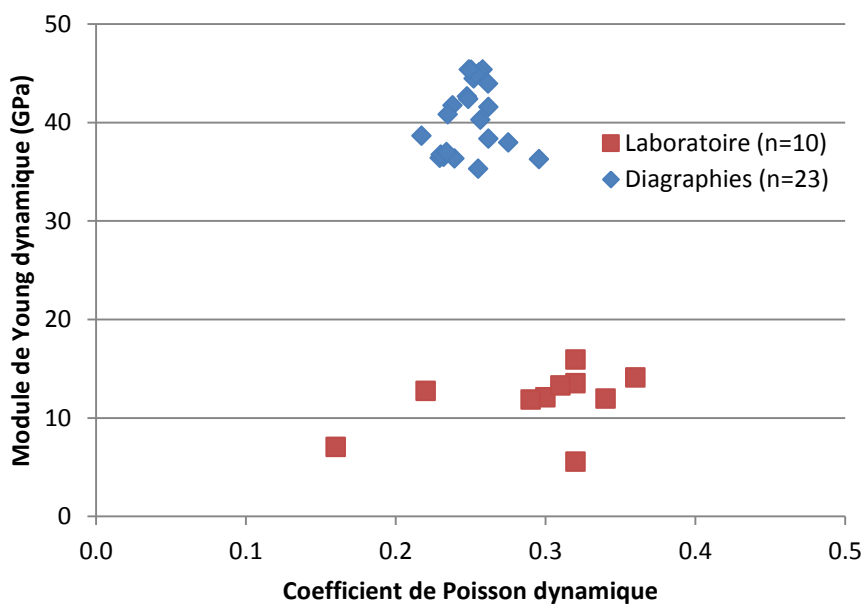


Figure 29 : Comparaison entre les modules élastiques calculés à partir des tests réalisés en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et à partir des diagraphies du puits A267.

D'une manière plus générale, les V_p et V_s enregistrées pour les carottes analysées en laboratoire suivent une tendance comparable à celle observée pour les diagraphies des puits peu profonds de la série F et pour celles des puits pétroliers profonds de la série A (A266, A267 et A279). Les puits peu profonds (série F) présentent des valeurs intermédiaires entre les deux autres jeux de données (figure 30).

Les valeurs de v dynamiques dérivées des carottes sont dans la fourchette de valeurs correspondant aux puits des séries A et F (figure 31). Les valeurs de E dynamiques dérivées des carottes sont en revanche nettement inférieures à celles estimées à partir des diagraphies pour les puits des séries A et F (figure 31).

8.2 Synthèse

Il a été vu à la section 7.2 que le calage des diagraphies par les résultats des tests statiques de laboratoire n'était pas possible avec les données disponibles. La comparaison des données dynamiques de laboratoire aux diagraphies a par contre indiqué que les différents jeux de données dynamiques sont cohérents entre eux. Les V_p et V_s enregistrées pour les carottes analysées en laboratoire suivent une tendance comparable à celle observée pour les diagraphies des puits profonds et peu profonds. De même, les valeurs de v dynamiques calculées pour les carottes sont dans la fourchette de valeurs correspondant aux puits. Les valeurs de E dynamiques dérivées des carottes sont en revanche nettement inférieures à celles estimées à partir des diagraphies pour les puits profonds et peu profonds, les puits peu profonds ayant des valeurs de E intermédiaires entre les deux autres jeux de données.

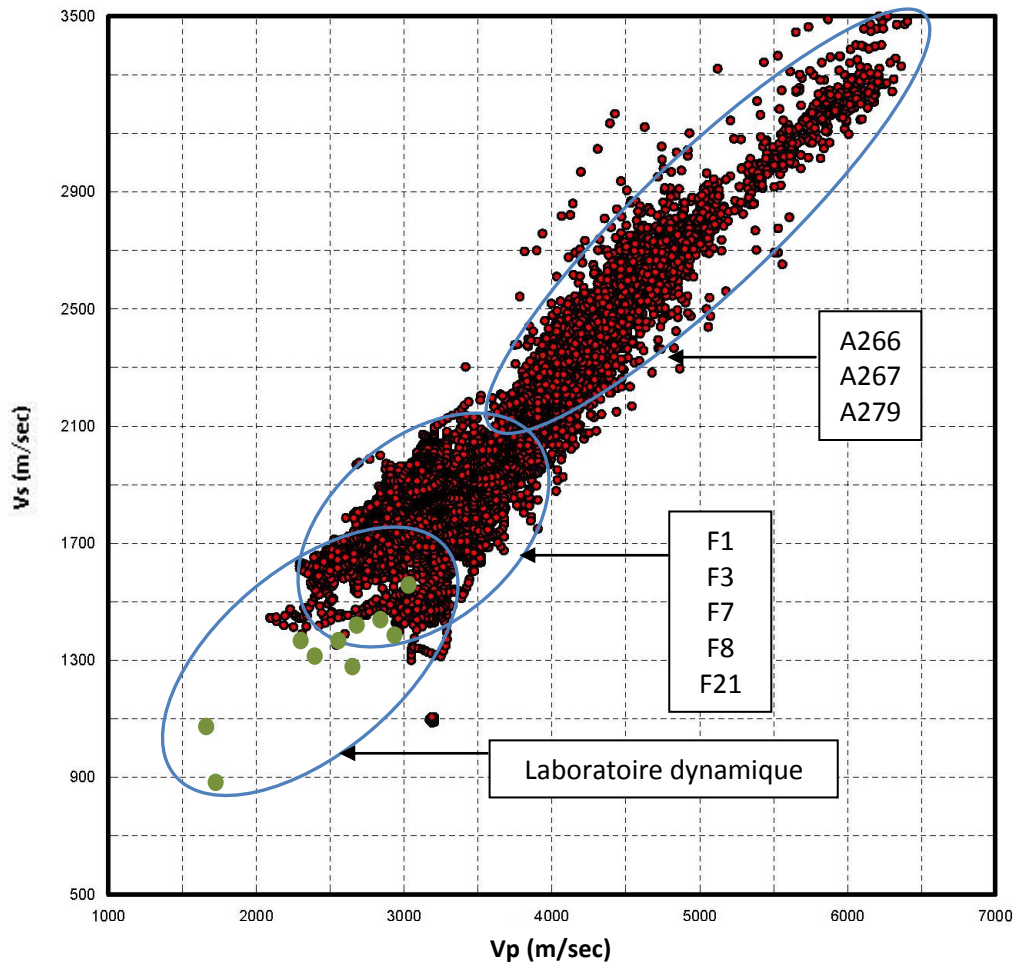


Figure 30 : Comparaison entre les vitesses de propagation des ondes P et S mesurées en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et en diagraphies (puits profonds A266, A267, A279 et puits peu profonds F1, F3, F7, F8 et F21).

La différence observée dans les valeurs de E entre les données dynamiques de laboratoire, les données des puits F peu profonds et les données des puits A profonds peut être expliquée de manière qualitative en faisant appel à la notion de pression de confinement et aux phénomènes de décompaction qui affectent les carottes et les formations à faibles profondeurs.

Dans le premier cas il a été indiqué précédemment (section 5.1) que la pression de confinement, tant qu'elle demeurait faible (de l'ordre de 4 à 10 MPa), n'avait pas d'impact significatif sur les valeurs de E mesurées en laboratoire, au moins dans le cas des tests statiques. La déformation des échantillons observée lors des tests réalisés avec une pression de confinement plus importante (30 MPa) empêche ici de procéder à des tests dans des conditions proches de celles qui règnent en profondeur, de l'ordre de 25 MPa dans le cas des échantillons analysés.

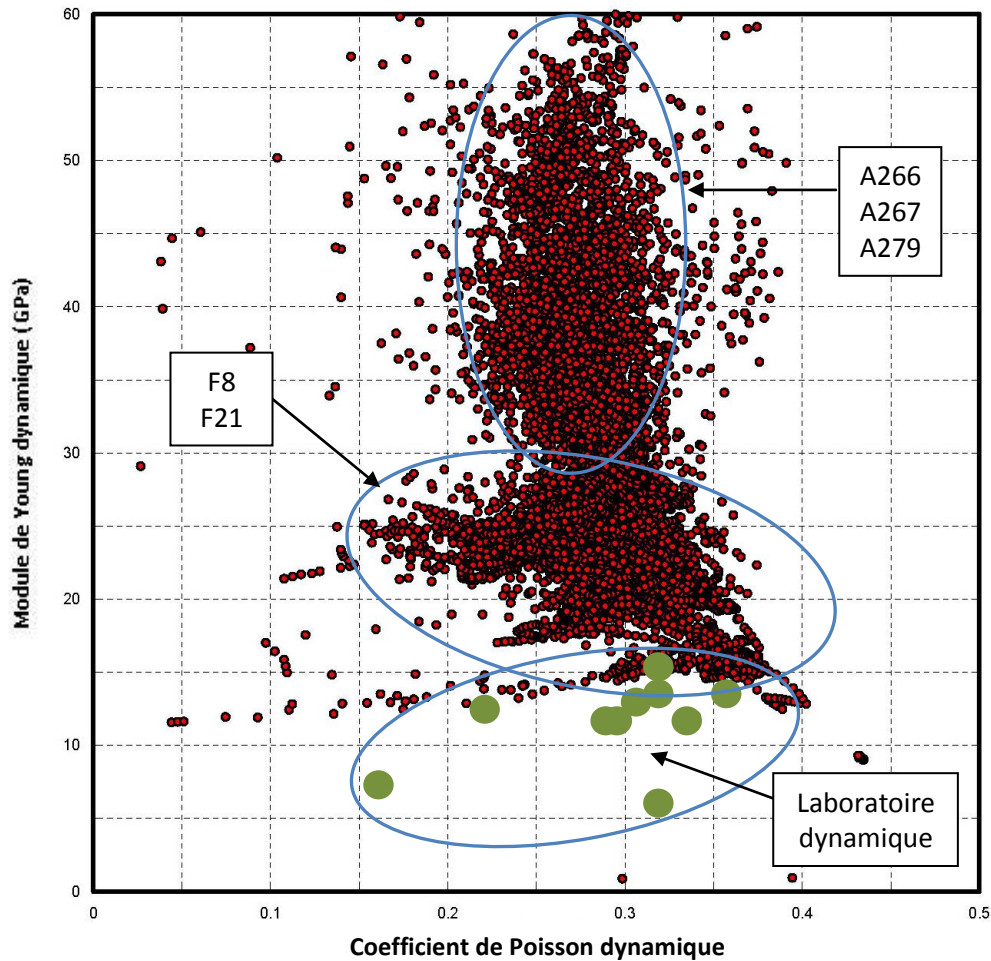


Figure 31 : Comparaison entre les modules élastiques calculés à partir des tests dynamiques réalisés en laboratoire (carottes de shale pur ou compensées) et à partir des diagraphies des puits A266, A267, A279, F8 et F21.

Par ailleurs, la décompaction subie par les carottes à partir du moment où elles sont collectées et remontées en surface, puis les manipulations auxquelles elles sont soumises (vibrations durant le transport et le sciage, etc.) peuvent générer des microfissures qui n'entraînent pas nécessairement une perte de cohésion visible de l'échantillon mais qui altèrent néanmoins son intégrité structurale. Cette perte d'intégrité se traduit de manière qualitative par une diminution des valeurs de E mesurées en laboratoire, autant par les procédés statiques que dynamiques (Barree et al., 2009). Ce phénomène de décompaction peut être particulièrement sévère dans le cas des shales gazéifères comme c'est le cas ici, en raison de la fabrique laminée (finement stratifiée) et de la faible perméabilité du shale. La fabrique laminée du shale se traduit par l'existence de plans de faiblesse préférentiels parallèles au litage qui, lors de la décompaction de la carotte durant son prélèvement, peut favoriser l'apparition de microfissures. La faible perméabilité du shale exacerbe ce phénomène dans le cas des shales gazéifères surpressurisés, car le gaz naturel piégé dans la porosité de la roche n'a pas d'autre conduit de migration que les microfissures naturelles ou induites.

9. Conclusions et recommandations

Les résultats des tests dynamiques pratiqués en laboratoire paraissent homogènes et généralement peu questionnables, autant dans le cas des échantillons de coulis purs que dans le cas des carottes de shale pur ou compensées. Dans l'ensemble, les résultats des tests dynamiques semblent cohérents et recevables même si une population statistique plus importante aurait été souhaitable. La comparaison des résultats des tests dynamiques avec les diagraphies disponibles pour le puits A267 ainsi que pour deux autres puits pétroliers et gaziers et pour les puits peu profonds de la série F suggère que les faibles valeurs du module de Young dynamique obtenues en laboratoire peuvent possiblement être expliquées par une perte d'intégrité structurale des carottes avant leur arrivée au laboratoire. Des inconnues demeurent, notamment en ce qui a trait à l'hétérogénéité et à l'anisotropie des matériaux testés : homogène et isotrope dans le cas des coulis purs, hétérogène et anisotrope dans le cas des shales purs, et d'une complexité accrue dans le cas des carottes de shale compensées par un coulis. Pour évaluer l'influence de ces facteurs sur la variabilité observée des résultats, il est recommandé de caractériser l'anisotropie des carottes de shale pur et compensées en pratiquant des tests acoustiques selon différentes orientations par rapport à l'axe long des carottes. Cette caractérisation devrait être considérée dans un second temps seulement, la priorité devant être accordée à la validation du protocole d'analyse statique.

Contrairement aux résultats des tests dynamiques, les résultats des tests statiques réalisés en laboratoire sur les échantillons témoins de coulis de gypse et de ciment, ainsi que sur les échantillons de carottes de shale pur ou compensées, font preuve d'une grande hétérogénéité en particulier en ce qui concerne le calcul du coefficient de Poisson. Cette observation sème le doute quant à la reproductibilité des analyses statiques, et le nombre limité de données disponibles ne permet pas de lever ce doute et de confirmer la reproductibilité des tests pratiqués.

Par ailleurs, une proportion appréciable des valeurs de coefficient de Poisson statiques calculées s'avèrent supérieures à 0,5. Même si des valeurs de coefficient de Poisson statiques supérieures à 0,5 peuvent être considérées recevables dans certaines conditions analytiques particulières, les valeurs de coefficient de Poisson dynamiques, qu'elles proviennent d'analyses réalisées en laboratoire ou de diagraphies, ne peuvent jamais excéder 0,5. L'objectif ultime des tests statiques étant le calage des résultats dynamiques, il apparaît important de revoir le protocole analytique suivi pour les analyses statiques de manière à pouvoir comparer les résultats statiques et dynamiques.

La révision du protocole d'analyse des tests statiques s'avère également nécessaire de manière à clarifier l'influence que la présence d'un coulis peut exercer sur les résultats d'analyse des carottes compensées.

La compréhension de ces mécanismes est considérée comme un préalable à la poursuite des analyses sur des carottes compensées, et une démarche expérimentale est proposée en ce sens, laquelle pourra être adaptée selon les besoins et les avis des chercheurs impliqués dans le projet :

- 1) Stabilité des coulis purs et reproductibilité des tests statiques pratiqués :

- Pour les coulis déjà utilisés, comparer leurs propriétés et la variabilité des résultats aux propriétés de coulis préparés dans des conditions similaires par le même laboratoire dans le cadre d'autres projets, ou à des bases de données extérieures.
 - Pour les coulis qui seront préparés dans le futur : identifier de possibles variations dans les conditions expérimentales (pureté du matériau, durée de mûrissement, taux de chargement, etc.) et établir le protocole de préparation qui offre la meilleure reproductibilité.
 - Comparer la sensibilité des mesures réalisées sur ces nouveaux coulis (stables) avec les erreurs instrumentales intrinsèques.
 - Obtenir suffisamment d'échantillons (plus d'une douzaine dans chaque catégorie) pour pouvoir réaliser des essais sur une population statistique suffisante.
- 2) Influence de la compensation sur les carottes :
- Préparer et tester une série de paires d'échantillons constituées d'un échantillon de coulis pur et d'un échantillon du même coulis, tronqué et compensé par un coulis aux propriétés différentes (par exemple, ciment et gypse, ou deux ciments de densités différentes).
 - Procéder de la même manière avec des paires d'échantillons constituées d'une carotte de roche pure (shale si possible) et d'une carotte de roche tronquée et compensée par un coulis.

Pour la réalisation de la dernière étape (validation de la méthode avec des échantillons de roche), une source possible pour ces échantillons serait les carottes prélevées lors du forage des puits peu profonds de la série F. Ces carottes sont la propriété de la CGC et l'on dispose d'un enregistrement diagraphique pour comparer les résultats dynamiques, à l'exception de la diagraphie de densité totale qui devra être mesurée en laboratoire.

Le calage des propriétés géomécaniques dérivées des diagraphies à l'aide des mesures réalisées en laboratoire sur des carottes représente une étape cruciale dans l'élaboration d'un modèle géomécanique réaliste. Du succès de ce calage dépendent de nombreuses applications en ingénierie et en géologie pétrolière, notamment en ce qui a trait à l'anticipation des risques géologiques tels la stabilité des parois durant les opérations de forage ou la définition des paramètres de fracturation hydraulique. À l'heure actuelle, ce calage n'est possible qu'à partir d'échantillons de carottes conservés dans des conditions optimales. La plupart des échantillons de carottes issus de forages anciens, généralement conservés dans les entrepôts gouvernementaux, sont tronqués dans le sens de la longueur et la contrepartie manquante a été utilisée pour réaliser d'autres types d'analyses. Pouvoir réaliser des essais géomécaniques en laboratoire sur ces échantillons tronqués après les avoir compensés à l'aide d'un coulis représenterait une percée méthodologique majeure qui ouvrirait la porte à des caractérisations géomécaniques de portée régionale. Très peu de recherches sur la compensation des carottes dans le cas des études géomécaniques ont été faites jusqu'à maintenant et les essais en laboratoire qui sont examinés dans ce rapport représentent une approche originale et novatrice. Les résultats de ces essais permettent de mieux apprécier les défis techniques impliqués et constituent une étape importante vers l'utilisation en routine d'échantillons de carottes autrement impropres aux essais géomécaniques. Cette avenue de recherche devrait être développée plus avant et les recommandations formulées ici vont dans ce sens.

Remerciements

L'auteur remercie Denis Labrie (CanmetMINES) pour son implication et sa collaboration inestimables dans ce projet ainsi que Denis Lavoie (Commission géologique du Canada) pour l'obtention des échantillons de shale et pour la lecture critique de cette contribution.

Ce projet a été réalisé avec le support financier de Ressources naturelles Canada à travers le programme Géoscience environnementale du Secteur des Sciences de la Terre (Commission géologique du Canada, division Québec – CGC-Québec) financé par les programmes ÉcoÉnergie et PRDE (Programme de recherche et de développement énergétiques) du Secteur de l'Énergie.

Références

Almarzooq, A., Aljeshi, H., AlAkeely, A., 2014. Calibrating log derived stress profiles in anisotropic shale gas formations - incorporating lab and field's measurements for localized models. International Petroleum Technology Conference, IPTC-17246-MS, 18p.

ASTM, 2015a. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. American Society for Testing and Materials, standard D2845, 8p.

ASTM, 2015b. Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. American Society for Testing and Materials, standard D7012, 9p.

Barree, R.D., Gilbert, J.V., Conway, M., 2009. Stress and rock property profiling for unconventional reservoir stimulation. Society of Petroleum Engineers, SPE-118703-MS, 18p.

Bordeleau, G., Rivard, C., Lavoie, D., Mort, A., Ahad, J., Malet, X. and Xu, X. 2015. Identifying the source of methane in groundwater in a 'virgin' area with regards to shale gas exploitation: a multi-isotope approach. 11th Applied Isotope Geochemistry Conference, Orléans, France. Procedia Earth and Planetary Science, v. 13, p. 219-222.

Fjaer, E., Larsen, I., Scheldt, T., 2005. What is the Poisson's ratio of a soft rock ? American Rock Mechanics Association, ARMA/USRMS 05-826, 7p.

Higgins, S.M., 2006. Geomechanical modeling as a reservoir characterization tool at Rulison Field, Piceance Basin, Colorado. M. Sc. thesis, Colorado School of Mines, 151p.

Kuhinek, D., Zoric, I., Hrzenjak, P., 2011. Measurement uncertainty in testing of uniaxial compressive strength and deformability of rock samples. Measurement Science Review, v.11, p.112-117.

Labrie, D., 2015. Résistance mécanique et pressions de fissuration de quelques matériaux rocheux sédimentaires typiques. Conférence GéoQuébec 2015, 9p.

Li, Y., Schmitt, D.R., 1997. Well-bore bottom stress concentration and induced core fractures. AAPG Bulletin, v.81, p.1909-1925.

Morales, R.H., Marcinew, R.P., 1993. Fracturing of high permeability formation: Mechanical properties correlations. Society of Petroleum Engineers, SPE-26561-MS, 9p.

Rivard, C., Bordeleau, G., Lavoie, D, 2015. Assessment of Potential Impacts of Shale Gas Development on Shallow Aquifers in the St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada. GAC-MAC Annual meeting, Montreal, May 3-6, 2015.

Rota, D., 2009. Geological Wellsite Report - Talisman Energy, Saint-Edouard No 1. Rapport SIGPEG No 2008OA267-02, 36p. Voir site internet <http://sigpeg.mrn.gouv.qc.ca>

Séjourné, S., 2014. Caractérisation de l'intégrité de la couverture du Shale d'Utica par l'analyse des diagraphies de forages pétroliers, Région de Saint-Édouard, Basses-Terres du Saint-Laurent, Province de Québec. Rapport de recherche soumis à la Commission géologique du Canada, 85p.

Thomsen, L., 1990. Poisson was not a geophysicist. *The Leading Edge*, December 1990, p.27-29.

Zoback, M. D., 2007. *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press, 449 pages.

Annexe 1 : Caractéristiques générales des échantillons analysés en laboratoire.

FH : fracturation hydraulique; CD : compression diamétrale (essai brésilien); CU : compression uniaxiale; CT : compression triaxiale.

Échantillon	Profondeur (m)	Matériau	Stratigraphie	Type d'essai
1742.84-FH	1742,84	Shale-Ciment	Lorraine	FH
1742.98-FH	1742,98	Shale-Ciment	Lorraine	FH
1742-G1-B		Ciment		CD
1742-G1-U		Ciment		CU
1742-G2-B		Ciment		CD
1742-G2-T		Ciment		CT
1742-G3-B		Ciment		CD
1742-G3-T		Ciment		CT
1743.13-U	1743,13	Shale	Lorraine	CU
1743.30-B	1743,30	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1743.38-B	1743,38	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1743.42-U	1743,42	Shale-Ciment	Lorraine	CU
1743.58-B	1743,58	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1743.68-B	1743,68	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1743.74-T	1743,74	Shale-Ciment	Lorraine	CT
1743.91-B	1743,91	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1744.00-B	1744,00	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1744.09-B	1744,09	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1744.19-B	1744,19	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1744.25-B	1744,25	Shale-Ciment	Lorraine	CD
1760.28-B	1760,28	Shale-Gypse	Lorraine	CD
1760.35-U	1760,35	Shale-Gypse	Lorraine	CU
1760.53-T	1760,53	Shale-Gypse	Lorraine	CT
1760.68-B	1760,68	Shale-Gypse	Lorraine	CD
1760.74-T	1760,74	Shale-Gypse	Lorraine	CT
1760-H1-B		Gypse		CD
1760-H1-U		Gypse		CU
1760-H2-B		Gypse		CD
1760-H2-T		Gypse		CT
1760-H3-T		Gypse		CT
1885.08-U	1885,08	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CU
1885.24-B	1885,24	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1885.33-T	1885,33	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CT
1885.54-T	1885,54	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CT
1885.99-B	1885,99	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1885-G1-B		Ciment		CD
1885-G1-U		Ciment		CU
1885-G2-B		Ciment		CD

Échantillon	Profondeur (m)	Matériau	Stratigraphie	Type d'essai
1885-G2-T		Ciment		CT
1885-G3-B		Ciment		CD
1886.06-B	1886,06	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1886.20-B	1886,20	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1886.33-T	1886,33	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CT
1892.38-FH	1892,38	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	FH
1892.53-U	1892,53	Shale	Utica Sup faillé	CU
1892.70-B	1892,70	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1892.79-B	1892,79	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1892.88-B	1892,88	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1893.04-U	1893,04	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CU
1893.21-B	1893,21	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1893.27-B	1893,27	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1893.34-T	1893,34	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CT
1893.52-B	1893,52	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	CD
1893.60-FH	1893,60	Shale-Ciment	Utica Sup faillé	FH
1893-G1-B		Ciment		CD
1893-G1-U		Ciment		CU
1893-G2-B		Ciment		CD
1893-G2-T		Ciment		CT
1893-G3-B		Ciment		CD
1893-G3-FH		Ciment		FH
1926.89-U	1926,89	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CU
1927.06-T	1927,06	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CT
1927.27-U	1927,27	Shale	Lorraine faillé	CU
1927.44-B	1927,44	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CD
1927.68-B	1927,68	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CD
1927.75-U	1927,75	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CU
1927.94-B	1927,94	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CD
1927-H1-B		Gypse		CD
1927-H1-U		Gypse		CU
1927-H2-B		Gypse		CD
1927-H2-T		Gypse		CT
1928.00-T	1928,00	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CT
1928.25-B	1928,25	Shale-Gypse	Lorraine faillé	CD
1931.37-T	1931,37	Shale-Ciment	Lorraine faillé	CT
1931.66-B	1931,66	Shale-Ciment	Lorraine faillé	CD
1931.75-U	1931,75	Shale	Lorraine faillé	CU
1931.96-B	1931,96	Shale-Ciment	Lorraine faillé	CD
1931-G1-U		Ciment		CU
1931-G2-T		Ciment		CT
1931-G3-FH		Ciment		FH
1931-G4-FH		Ciment		FH
1932.04-FH	1932,04	Shale-Ciment	Lorraine faillé	FH
1932.18-FH	1932,18	Shale-Ciment	Lorraine faillé	FH

Échantillon	Profondeur (m)	Matériau	Stratigraphie	Type d'essai
1932.31-B	1932,31	Shale-Ciment	Lorraine faillé	CD
1932.40-B	1932,40	Shale-Ciment	Lorraine faillé	CD
1932.50-B	1932,50	Shale-Ciment	Lorraine faillé	CD
1932-G1-B		Ciment		CD
1932-G1-U		Ciment		CU
1932-G2-B		Ciment		CD
1932-G2-T		Ciment		CT
1932-G3-B		Ciment		CD
1932-G3-FH		Ciment		FH
1964.60-U	1964,60	Shale	Utica Supérieur	CU
1964.76-U	1964,76	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CU
1964.99-B	1964,99	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CD
1964-G1-U		Ciment		CU
1964-G2-U		Ciment		CT
1965.14-B	1965,14	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CD
1965.25-B	1965,25	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CD
1965.39-T	1965,39	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CT
1965.71-U	1965,71	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CU
1965.98-B	1965,98	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CD
1965-G1-B		Ciment		CD
1965-G2-B		Ciment		CD
2027.91-FH	2027,91	Shale-Ciment	Utica Supérieur	FH
2028.00-B	2028,00	Shale-Ciment	Utica Supérieur	CD
2028-G1-B		Ciment		CD
2028-G1-U		Ciment		CU
2028-G2-B		Ciment		CD
2028-G2-T		Ciment		CT
2028-G3-B		Ciment		CD
2028-G3-FH		Ciment		FH

Annexe 2 : Description du mode de rupture observé.

Échantillon	Mode de rupture
1742.84-FH	Éprouvette altérée, désintégrée, impossible à forer.
1742.98-FH	Éprouvette altérée, désintégrée, impossible à forer.
1742-G1-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1742-G1-U	Cisaillement massif x 2 extrémités.
1742-G2-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1742-G2-T	Cisaillement massif x 2 extrémités (+/-1 cm).
1742-G3-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1742-G3-T	Cisaillement planaire x éprouvette, L: 110 mm, AR: 55°.
1743.13-U	Cisaillement massif, fendage vertical, parfait.
1743.30-B	Rupture massive, éprouvette complètement désagrégée.
1743.38-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1743.42-U	Cisaillement massif, fendage vertical, shale et ciment.
1743.58-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1743.68-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1743.74-T	Cisaillement massif, shale et ciment.
1743.91-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1744.00-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1744.09-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1744.19-B	Défaut structural, e.g. joint à 55° p/r horizontal.
1744.25-B	Défaut structural, e.g. joint à 55° p/r horizontal.
1760.28-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1760.35-U	Cisaillement massif, fendage vertical.
1760.53-T	Cisaillement conique/massif, fendage vertical.
1760.68-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1760.74-T	Cisaillement oblique/ondulé, L: 112 mm, AR: 56°.
1760-H1-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 5 mm.
1760-H1-U	Cisaillement conique/massif, fendage vertical.
1760-H2-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 7 mm.
1760-H2-T	Cisaillement conique/massif, fendage vertical.
1760-H3-T	Cisaillement conique/ondulé, partie inférieure, L: 122 mm, AR: 56°.
1885.08-U	Cisaillement conique/massif parfait x 2 extrémités, AR: 65°.
1885.24-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1885.33-T	Cisaillement conique/massif parfait x 2 extrémités, AR: 65°.
1885.54-T	Cisaillement planaire x éprouvette, S&G, L: 109 mm, AR: 55°.
1885.99-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1885-G1-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 8 mm.
1885-G1-U	Cisaillement conique/massif parfait, fendage vertical.
1885-G2-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 3 mm.

Échantillon	Mode de rupture
1885-G2-T	Cisaillement massif, fendage vertical.
1885-G3-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1886.06-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1886.20-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1886.33-T	Cisaillement planaire/ondulé x 2 extrémités, S&G, L: 147 mm, AR: 65°.
1892.38-FH	Matériau folié semi-intact, PF > PE.
1892.53-U	Cisaillement massif, fendage vertical, parfait.
1892.70-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1892.79-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1892.88-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1893.04-U	Fendage vertical, cisaillement oblique, interface intact.
1893.21-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1893.27-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1893.34-T	Cisaillement oblique parfait, interface intact, AR: 61°.
1893.52-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1893.60-FH	Matériau folié fissuré, PF = PE.
1893-G1-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1893-G1-U	Fendage vertical, cisaillement oblique parfait, 2 extrémités, AR: 62°.
1893-G2-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 4 mm.
1893-G2-T	Fendage, cisaillement, parfait.
1893-G3-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1893-G3-FH	Matériau homogène intact, fracture radiale-axiale, PF > PE.
1926.89-U	Cisaillement massif, fendage vertical, S&H.
1927.06-T	Cisaillement massif, fendage vertical, S&H.
1927.27-U	Cisaillement massif, fendage vertical, parfait.
1927.44-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1927.68-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1927.75-U	Cisaillement massif, fendage vertical, S&H.
1927.94-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1927-H1-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1927-H1-U	Cisaillement conique/massif, fendage vertical, parfait.
1927-H2-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1927-H2-T	Cisaillement planaire/ondulé x 2 extrémités, parfait, AR: 65°.
1928.00-T	Élément str. (?), cisaillement planaire/ondulé x 2 extrémités, S&H, AR: 65°.
1928.25-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1931.37-T	Cisaillement oblique parfait, interface intact, AR: 62°.
1931.66-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1931.75-U	Cisaillement massif, fendage vertical, parfait.
1931.96-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1931-G1-U	Cisaillement massif conique, parfait.
1931-G2-T	Cisaillement oblique massif, type barillet, L:11.5 cm, AR: 56°.
1931-G3-FH	Matériau homogène intact, fracture radiale-axiale, PF > PE.
1931-G4-FH	Matériau homogène intact, fracture radiale-axiale, PF > PE.
1932.04-FH	Matériau folié fissuré, PF = PE.
1932.18-FH	Matériau folié fissuré, PF = PE.

Échantillon	Mode de rupture
1932.31-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1932.40-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1932.50-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
1932-G1-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 2-5 mm.
1932-G1-U	Cisaillement massif conique, parfait.
1932-G2-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1932-G2-T	Cisaillement massif, type barillet.
1932-G3-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1932-G3-FH	Matériau homogène intact, fracture radiale-axiale, PF > PE.
1964.60-U	Cisaillement massif, fendage vertical, parfait.
1964.76-U	Élément structural majeur (?), quasi-vertical, cisaillement et fendage vert.
1964.99-B	Fendage diamétral (vertical). Testé perpendic. à l'interface shale-béton.
1964-G1-U	Cisaillement massif, fendage vertical.
1964-G2-U	Cisaillement massif, fendage vertical.
1965.14-B	Écrasement/fendage diamétral. Testé parallèlem. à l'interface shale-béton.
1965.25-B	Écrasement/fendage diamétral. Testé parallèlem. à l'interface shale-béton.
1965.39-T	Élément struct. mineur/majeur (?), quasi-vertical, cis. masse, déficient (?).
1965.71-U	Cisaillement massif, fendage vertical, parfait.
1965.98-B	Fendage diamétral (vertical). Testé perpendic. à l'interface shale-béton.
1965-G1-B	Matériau poreux fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
1965-G2-B	Matériau poreux, fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
2027.91-FH	Matériau folié fissuré, PF = PE.
2028.00-B	Fendage transversal (discage), écrasement/fendage diamétral.
2028-G1-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 3 mm.
2028-G1-U	Cisaillement massif conique, parfait.
2028-G2-B	Fendage diamétral (vertical) courbe, légèrement excentré 3 mm.
2028-G2-T	Cisaillement massif, type barillet.
2028-G3-B	Fendage diamétral (vertical), demi-lunes parfaites.
2028-G3-FH	Matériau homogène intact, fracture radiale-axiale, PF > PE.

Annexe 3 : Mesures de densité et résultats des tests dynamiques.

En rouge : résultats rejetés dans le cadre de la présente étude.

Échantillon	Densité (g/cm ³)	Référence de densité	Onde P (km/sec)	Onde S (km/sec)	Vp/Vs	Young dynamique (GPa)	Poisson dynamique
1742.84-FH	2,66	shale	2,02	N/D		N/D	N/D
1742.98-FH	2,65	shale	1,69	N/D		N/D	N/D
1742-G1-B	2,25	ciment	N/D	N/D			
1742-G1-U	2,14	ciment	3,89	1,84	2,11	19,75	0,360
1742-G2-B	2,25	ciment	N/D	N/D			
1742-G2-T	2,14	ciment	3,89	1,86	2,09	20,00	0,350
1742-G3-B	2,24	ciment	N/D	N/D			
1742-G3-T	2,14	ciment	3,86	2,02	1,91	22,84	0,310
1743.13-U	2,66	shale	1,73	0,89	1,94	5,54	0,320
1743.30-B	2,62	shale	N/D	N/D			
1743.38-B	2,61	shale	N/D	N/D			
1743.42-U	2,66	shale	1,86	N/D		N/D	N/D
1743.58-B	2,65	shale	N/D	N/D			
1743.68-B	2,63	shale	N/D	N/D			
1743.74-T	2,64	shale	1,73	N/D		N/D	N/D
1743.91-B	2,62	shale	N/D	N/D			
1744.00-B	2,62	shale	N/D	N/D			
1744.09-B	2,65	shale	N/D	N/D			
1744.19-B	2,64	shale	N/D	N/D			
1744.25-B	2,65	shale	N/D	N/D			
1760.28-B	2,57	shale	N/D	N/D			
1760.35-U	2,52	shale	2,84	1,45	1,96	13,53	0,320
1760.53-T	2,53	shale	2,60	1,39	1,87	12,10	0,300
1760.68-B	2,50	shale	N/D	N/D			
1760.74-T	2,54	shale	3,05	1,58	1,93	15,92	0,320
1760-H1-B	1,76	gypse	N/D	N/D			
1760-H1-U	1,73	gypse	3,40	1,82	1,87	14,88	0,300
1760-H2-B	1,79	gypse	N/D	N/D			
1760-H2-T	1,72	gypse	3,37	1,83	1,84	14,88	0,290
1760-H3-T	1,84	gypse	3,35	1,78	1,88	15,21	0,300
1885.08-U	2,65	shale	2,79	N/D		N/D	N/D
1885.24-B	2,64	shale	N/D	N/D			
1885.33-T	2,63	shale	2,65	N/D		N/D	N/D
1885.54-T	2,65	shale	2,68	1,42	1,89	13,28	0,310
1885.99-B	2,63	shale	N/D	N/D			
1885-G1-B	2,24	ciment	N/D	N/D			
1885-G1-U	2,23	ciment	4,18	2,16	1,94	27,43	0,320
1885-G2-B	2,24	ciment	N/D	N/D			

Échantillon	Densité (g/cm ³)	Référence de densité	Onde P (km/sec)	Onde S (km/sec)	Vp/Vs	Young dynamique (GPa)	Poisson dynamique
1885-G2-T	2,26	ciment	4,16	2,20	1,89	28,62	0,310
1885-G3-B	2,26	ciment	N/D	N/D			
1886.06-B	2,62	shale	N/D	N/D			
1886.20-B	2,63	shale	N/D	N/D			
1886.33-T	2,64	shale	2,79	N/D		N/D	N/D
1892.38-FH	2,63	shale	1,96	N/D			
1892.53-U	2,64	shale	1,94	1,51	1,28	8,61	-0,290
1892.70-B	2,64	shale	N/D	N/D			
1892.79-B	2,67	shale	N/D	N/D			
1892.88-B	2,67	shale	N/D	N/D			
1893.04-U	2,64	shale	2,13	N/D			
1893.21-B	2,64	shale	N/D	N/D			
1893.27-B	2,58	shale	N/D	N/D			
1893.34-T	2,63	shale	1,92	N/D			
1893.52-B	2,66	shale	N/D	N/D			
1893.60-FH	2,66	shale	2,00	N/D			
1893-G1-B	2,21	ciment	N/D	N/D			
1893-G1-U	2,22	ciment	4,13	2,11	1,96		
1893-G2-B	2,22	ciment	N/D	N/D			
1893-G2-T	2,23	ciment	4,12	2,13	1,93		
1893-G3-B	2,23	ciment	N/D	N/D			
1893-G3-FH	2,21	ciment	4,20	2,15	1,95		
1926.89-U	2,67	shale	2,65	1,29	2,05	11,96	0,340
1927.06-T	2,68	shale	2,59	N/D		N/D	N/D
1927.27-U	2,66	shale	1,68	1,07	1,57	7,06	0,160
1927.44-B	2,67	shale	N/D	N/D			
1927.68-B	2,69	shale	N/D	N/D			
1927.75-U	2,66	shale	2,97	1,40		14,11	0,360
1927.94-B	2,66	shale	N/D	N/D			
1927-H1-B	1,68	gypse	N/D	N/D			
1927-H1-U	1,77	gypse	3,51	1,86	1,89	15,96	0,300
1927-H2-B	1,69	gypse	N/D	N/D			
1927-H2-T	1,80	gypse	3,46	1,86	1,86	16,23	0,300
1928.00-T	2,67	shale	2,40	1,31	1,83	11,85	0,290
1928.25-B	2,70	shale	N/D	N/D			
1931.37-T	2,65	shale	1,90	N/D			
1931.66-B	2,65	shale	N/D	N/D			
1931.75-U	2,72	shale	2,31	1,39	1,66	12,74	0,220
1931.96-B	2,68	shale	N/D	N/D			
1931-G1-U	2,23	ciment	4,06	2,08	1,95		
1931-G2-T	2,24	ciment	4,11	2,08	1,98		
1931-G3-FH	2,22	ciment	4,11	2,08	1,98		
1931-G4-FH	2,23	ciment	4,06	2,08	1,95		
1932.04-FH	2,65	shale	1,79	N/D			
1932.18-FH	2,60	shale	1,49	N/D			

Échantillon	Densité (g/cm ³)	Référence de densité	Onde P (km/sec)	Onde S (km/sec)	Vp/Vs	Young dynamique (GPa)	Poisson dynamique
1932.31-B	2,65	shale	N/D	N/D			
1932.40-B	2,63	shale	N/D	N/D			
1932.50-B	2,63	shale	N/D	N/D			
1932-G1-B	2,21	ciment	N/D	N/D			
1932-G1-U	2,23	ciment	4,10	2,10	1,95		
1932-G2-B	2,23	ciment	N/D	N/D			
1932-G2-T	2,22	ciment	4,11	2,10	1,96		
1932-G3-B	2,25	ciment	N/D	N/D			
1932-G3-FH	2,23	ciment	4,11	2,11	1,95		
1964.60-U	2,64	shale	1,83	N/D		N/D	N/D
1964.76-U	2,64	shale	1,98	N/D		N/D	N/D
1964.99-B	2,65	shale	N/D	N/D			
1964-G1-U	1,85	ciment	3,15	1,78	1,77		
1964-G2-U	1,89	ciment	3,09	1,73	1,79		
1965.14-B	2,63	shale	N/D	N/D			
1965.25-B	2,62	shale	N/D	N/D			
1965.39-T	2,59	shale	1,95	N/D		N/D	N/D
1965.71-U	2,61	shale	2,11	N/D		N/D	N/D
1965.98-B	2,61	shale	N/D	N/D			
1965-G1-B	1,86	ciment	N/D	N/D			
1965-G2-B	1,81	ciment	N/D	N/D			
2027.91-FH	2,63	shale	1,39	N/D			
2028.00-B	2,58	shale	N/D	N/D			
2028-G1-B	2,24	ciment	N/D	N/D			
2028-G1-U	2,28	ciment	3,95	2,02	1,96		
2028-G2-B	2,26	ciment	N/D	N/D			
2028-G2-T	2,28	ciment	4,08	2,08	1,96		
2028-G3-B	2,32	ciment	N/D	N/D			
2028-G3-FH	2,27	ciment	4,00	2,03	1,97		

Annexe 4 : Résultats des tests statiques.

Taux de chargement : (B) essais brésiliens (résistance à la traction indirecte) réalisés à taux de chargement constant exprimé en kN/sec, (U/T) : essais uniaxiaux et triaxiaux réalisés à taux de déplacement axial constant exprimé en mm/sec. En rouge : résultats rejetés dans le cadre de la présente étude.

Échantillon	Taux de chargement (B:kN/sec) (U/T:mm/sec)	Sigma 1 (MPa)	Sigma 3 (MPa)	C _{0,T} ou T ₀ (MPa)	Déf _{axial} pic (%)	Young statique (GPa)	Poisson statique
1742.84-FH							
1742.98-FH							
1742-G1-B	0,100	19,53	-6,51	-6,51	N/D	N/D	N/D
1742-G1-U	0,0020	37,40	0,0	37,40	0,394	13,06	0,179
1742-G2-B	0,100	18,69	-6,23	-6,23	N/D	N/D	N/D
1742-G2-T	0,0020	61,56	4,0	61,56	0,872	13,12	0,145
1742-G3-B	0,100	18,87	-6,29	-6,29	N/D	N/D	N/D
1742-G3-T	0,0020	82,81	10,0	82,81	1,349	13,11	0,144
1743.13-U	0,0025	117,84	0,0	117,84	1,126	14,14	N/D
1743.30-B	0,100	21,18	-7,06	-7,06	N/D	N/D	N/D
1743.38-B	0,100	22,17	-7,39	-7,39	N/D	N/D	N/D
1743.42-U	0,0020	60,44	0,0	60,44	1,049	8,88	0,580
1743.58-B	0,100	25,17	-8,39	-8,39	N/D	N/D	N/D
1743.68-B	0,100	20,43	-6,81	-6,81	N/D	N/D	N/D
1743.74-T	0,0020	64,69	4,0	64,69	0,785	13,18	0,115
1743.91-B	0,100	5,76	-1,92	-1,92	N/D	N/D	N/D
1744.00-B	0,100	22,71	-7,57	-7,57	N/D	N/D	N/D
1744.09-B	0,100	25,53	-8,51	-8,51	N/D	N/D	N/D
1744.19-B	0,100	0,36	-0,12	-0,12	N/D	N/D	N/D
1744.25-B	0,100	3,12	-1,04	-1,04	N/D	N/D	N/D
1760.28-B	0,118	18,96	-6,32	-6,32	N/D	N/D	N/D
1760.35-U	0,0025	75,48	0,0	75,48	1,067	8,63	1,274
1760.53-T	0,0025	119,38	30,0	119,38	1,297	10,05	0,788
1760.68-B	0,118	20,46	-6,82	-6,82	N/D	N/D	N/D
1760.74-T	0,0020	91,14	4,0	91,14	1,124	8,44	0,446
1760-H1-B	0,118	16,92	-5,64	-5,64	N/D	N/D	N/D
1760-H1-U	0,0025	56,84	0,0	56,84	0,383	15,86	0,209
1760-H2-B	0,118	18,15	-6,05	-6,05	N/D	N/D	N/D
1760-H2-T	0,0025	85,48	30,0	85,48	0,388	16,85	0,232
1760-H3-T	0,0020	63,06	4,0	63,06	0,415	16,68	0,184
1885.08-U	0,0025	50,31	0,0	50,31	0,487	14,20	0,289
1885.24-B	0,118	24,39	-8,13	-8,13	N/D	N/D	N/D
1885.33-T	0,0025	112,16	30,0	112,16	0,941	11,64	0,265
1885.54-T	0,0020	92,54	4,0	92,54	0,735	19,13	0,116
1885.99-B	0,118	24,33	-8,11	-8,11	N/D	N/D	N/D
1885-G1-B	0,118	14,88	-4,96	-4,96	N/D	N/D	N/D

Échantillon	Taux de chargement (B:kN/sec) (U/T:mm/sec)	Sigma 1 (MPa)	Sigma 3 (MPa)	C _{0,T} ou T ₀ (MPa)	Déf _{axial} pic (%)	Young statique (GPa)	Poisson statique
1885-G1-U	0,0025	67,44	0,0	67,44	0,515	18,75	0,213
1885-G2-B	0,118	16,17	-5,39	-5,39	N/D	N/D	N/D
1885-G2-T	0,0025	134,30	30,0	134,30	1,770	13,95	0,118
1885-G3-B	0,118	16,56	-5,52	-5,52	N/D	N/D	N/D
1886.06-B	0,118	25,59	-8,53	-8,53	N/D	N/D	N/D
1886.20-B	0,118	17,04	-5,68	-5,68	N/D	N/D	N/D
1886.33-T	0,0020	127,37	10,0	127,37	1,046	15,05	0,186
1892.38-FH							
1892.53-U	0,0025	117,77	0,0	117,77	0,719	23,89	N/D
1892.70-B	0,100	16,83	-5,61	-5,61	N/D	N/D	N/D
1892.79-B	0,100	10,53	-3,51	-3,51	N/D	N/D	N/D
1892.88-B	0,100	15,18	-5,06	-5,06	N/D	N/D	N/D
1893.04-U	0,0020	37,99	0,0	37,99	0,391	13,13	0,080
1893.21-B	0,100	16,95	-5,65	-5,65	N/D	N/D	N/D
1893.27-B	0,100	18,93	-6,31	-6,31	N/D	N/D	N/D
1893.34-T	0,0020	96,84	10,0	96,84	0,870	13,31	0,102
1893.52-B	0,100	24,03	-8,01	-8,01	N/D	N/D	N/D
1893.60-FH							
1893-G1-B	0,100	18,09	-6,03	-6,03	N/D	N/D	N/D
1893-G1-U	0,0020	63,41	0,0	63,41	0,451	19,45	0,180
1893-G2-B	0,100	17,64	-5,88	-5,88	N/D	N/D	N/D
1893-G2-T	0,0020	103,99	10,0	103,99	1,429	15,90	0,142
1893-G3-B	0,100	18,63	-6,21	-6,21	N/D	N/D	N/D
1893-G3-FH							
1926.89-U	0,0020	43,15	0,0	43,15	0,743	7,82	1,029
1927.06-T	0,0020	61,07	4,0	61,07	0,995	6,70	0,434
1927.27-U	0,0025	71,93	0,0	71,93	0,757	12,68	N/D
1927.44-B	0,100	18,69	-6,23	-6,23	N/D	N/D	N/D
1927.68-B	0,100	18,30	-6,10	-6,10	N/D	N/D	N/D
1927.75-U	0,0020	36,51	0,0	36,51	0,523	11,34	0,219
1927.94-B	0,100	29,91	-9,97	-9,97	N/D	N/D	N/D
1927-H1-B	0,100	14,55	-4,85	-4,85	N/D	N/D	N/D
1927-H1-U	0,0020	47,76	0,0	47,76	0,287	18,44	0,223
1927-H2-B	0,100	18,09	-6,03	-6,03	N/D	N/D	N/D
1927-H2-T	0,0020	51,13	4,0	51,13	0,721	8,04	0,092
1928.00-T	0,0020	91,73	10,0	91,73	1,058	10,10	0,134
1928.25-B	0,100	30,54	-10,18	-10,18	N/D	N/D	N/D
1931.37-T	0,0020	94,43	10,0	94,43	1,371	9,13	0,078
1931.66-B	0,100	24,06	-8,02	-8,02	N/D	N/D	N/D
1931.75-U	0,0025	62,35	0,0	62,35	0,513	14,00	N/D
1931.96-B	0,100	28,20	-9,40	-9,40	N/D	N/D	N/D
1931-G1-U	0,0020	64,08	0,0	64,08	0,501	18,19	0,155
1931-G2-T	0,0020	100,41	10,0	100,41	1,691	13,55	0,132
1931-G3-FH							
1931-G4-FH							

Échantillon	Taux de chargement (B:kN/sec) (U/T:mm/sec)	Sigma 1 (MPa)	Sigma 3 (MPa)	C _{0,T} ou T ₀ (MPa)	Déf _{axial} pic (%)	Young statique (GPa)	Poisson statique
1932.04-FH							
1932.18-FH							
1932.31-B	0,100	13,50	-4,50	-4,50	N/D	N/D	N/D
1932.40-B	0,100	17,82	-5,94	-5,94	N/D	N/D	N/D
1932.50-B	0,100	20,73	-6,91	-6,91	N/D	N/D	N/D
1932-G1-B	0,100	22,02	-7,34	-7,34	N/D	N/D	N/D
1932-G1-U	0,0020	64,44	0,0	64,44	0,449	19,63	0,176
1932-G2-B	0,100	19,83	-6,61	-6,61	N/D	N/D	N/D
1932-G2-T	0,0020	102,71	10,0	102,71	1,464	15,58	0,134
1932-G3-B	0,100	21,39	-7,13	-7,13	N/D	N/D	N/D
1932-G3-FH							
1964.60-U	0,0025	122,80	0,0	122,80	0,892	19,12	N/D
1964.76-U	0,0020	30,85	0,0	30,85	0,616	5,41	1,863
1964.99-B	0,100	16,95	-5,65	-5,650	N/D	N/D	N/D
1964-G1-U	0,0020	10,61	0,0	10,61	0,163	8,90	0,123
1964-G2-U	0,0020	12,98	0,0	12,98	0,219	8,21	0,085
1965.14-B	0,100	25,11	-8,37	-8,37	N/D	N/D	N/D
1965.25-B	0,100	35,55	-11,85	-11,85	N/D	N/D	N/D
1965.39-T	0,0020	61,78	4,0	61,78	0,967	10,78	0,178
1965.71-U	0,0020	67,90	0,0	67,90	0,861	9,86	0,862
1965.98-B	0,100	13,98	-4,66	-4,660	N/D	N/D	N/D
1965-G1-B	0,100	10,35	-3,45	-3,45	N/D	N/D	N/D
1965-G2-B	0,100	8,31	-2,77	-2,77	N/D	N/D	N/D
2027.91-FH							
2028.00-B	0,100	19,38	-6,46	-6,46	N/D	N/D	N/D
2028-G1-B	0,100	13,26	-4,42	-4,42	N/D	N/D	N/D
2028-G1-U	0,0020	61,19	0,0	61,19	0,493	17,34	0,123
2028-G2-B	0,100	22,95	-7,65	-7,65	N/D	N/D	N/D
2028-G2-T	0,0020	103,93	10,0	103,93	1,915	13,88	0,127
2028-G3-B	0,100	20,07	-6,69	-6,69	N/D	N/D	N/D
2028-G3-FH							