

Ressources naturelles Natural Resources Canada Canada

## COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA

### **DOSSIER PUBLIC 7907**

Étude géomécanique régionale de la Formation de Macasty et de sa couverture d'après les puits pétroliers et gaziers de l'Île d'Anticosti, Québec

S. Séjourné

2015





### COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA DOSSIER PUBLIC 7907

## Étude géomécanique régionale de la Formation de Macasty et de sa couverture d'après les puits pétroliers et gaziers de l'Île d'Anticosti, Québec

S. Séjourné Géologue consultant, Montréal, Québec

## 2015

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2015

doi:10.4095/296885

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

#### Notation bibliographique conseillée

Séjourné, S., 2015. Étude géomécanique régionale de la Formation de Macasty et de sa couverture d'après les puits pétroliers et gaziers de l'Île d'Anticosti, Québec; Commission géologique du Canada, Dossier public 7907, 114p. doi:10.4095/296885

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

# Table des matières

Table des matièresi
Liste des tableauxii
Liste des figuresiii
Résumé 1
Summary 2
Liste des abréviations 3
1. Introduction
1.1 Contexte de l'étude
1.2 Objectifs du projet
1.3 Portée et limitations de l'étude5
2. Intégration des données
2.1 Données diagraphiques
2.2 Rapports de fin de forage7
2.3 Définition des contacts stratigraphiques7
3. Définition des diagraphies acoustiques synthétiques de l'onde S 8
3.1 Méthodologie générale
3.2 Définition des corrélations pour le puits D0209
3.3 Diagraphies synthétiques de l'onde S pour les autres puits
4. Estimation des propriétés mécaniques 21
4.1 Constantes élastiques et indice de fragilité21
4.2 Pression de fluide
4.2.1 Essais aux tiges
4.2.2 Tests d'épanchement et d'intégrité 28
4.2.3 Densité de la boue de forage
4.3 Contrainte principale horizontale minimale
5. Interprétation des propriétés géomécaniques
5.1 Stratigraphie mécanique

5.1.1 Modules élastiques	37
5.1.2 Contrainte principale horizontale minimale	40
5.2 Variations régionales	40
5.2.1 Transects régionaux	40
5.2.2 Limites de la portée régionale de l'étude	45
6. Conclusions et recommandations	46
Remerciements	47
Références	48

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Profondeurs établies pour le toit des formations dans les puits considérés dans le cadre de la
présente étude. Une case vide signifie l'absence de cette unité7
Tableau 2 : Synthèse des corrélations observées entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques
déduites du puits D020 10
Tableau 3a : Synthèse des modules élastiques estimés pour les puits étudiés pour les formations de
Vauréal, d'English Head supérieur et d'English Head inférieur
Tableau 3b : Synthèse des modules élastiques estimés pour les puits étudiés pour les formations de
Macasty et de Mingan supérieur 27
Tableau 4 : Synthèse des résultats disponibles pour les tests d'épanchement ou d'intégrité réalisés sous
la base du coffrage de surface
Tableau 5a : Synthèse des valeurs estimées de la contrainte principale horizontale minimale (Sh_min) et
de son gradient pour les puits étudiés, pour les formations de Vauréal, d'English Head supérieur et
d'English Head inférieur
Tableau 5b : Synthèse des valeurs estimées de la contrainte principale horizontale minimale (Sh_min) et
de son gradient pour les puits étudiés, pour les formations de Macasty et de Mingan supérieur

# Liste des figures

Figure 1 : Carte géologique simplifiée de l'Ile d'Anticosti indiquant la localisation des forages pétroliers et
gaziers4
Figure 2 : Stratigraphie simplifiée de l'Ile d'Anticosti
Figure 3 : Exemple de corrélation observée entre les diagraphies acoustiques brutes (ici DTCO) et de
rayonnement gamma (GR) pour le puits D020 11
Figure 4 : Exemple de diagramme binaire permettant de vérifier la validité des corrélations établies pour
le puits D020
Figure 5 : Exemple de corrélation observée entre les diagraphies acoustiques (ici DTCO) et de résistivité
profonde (ILD2) pour le puits D02013
Figure 6 : Exemple de corrélation observée entre les diagraphies acoustiques (ici DTCO) et de densité
totale (RHOB) pour le puits D02014
Figure 7a : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le
puits D020 entre 150 et 650m 15
Figure 7b : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le
puits D020 entre 650 et 1125m
Figure 8a : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le
puits D014 entre 0 et 550m 17
Figure 8b : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le
puits D014 entre 0 et 550m
Figure 9 : Diagramme binaire permettant de vérifier la validité de la corrélation établie pour la diagraphie
acoustique de l'onde P dans le puits D014 19
Figure 10 : Diagramme binaire opposant les valeurs dynamiques de E et u estimées à partir des
diagraphies acoustiques et de densité totale pour le puits D014 22
Figure 11 : Détail de la variation des constantes élastiques en fonction de la profondeur pour le puits
D014 entre 700 et 970m
Figure 12 : Diagramme binaire opposant les valeurs dynamiques de E et u estimées à partir des
diagraphies acoustiques et de densité totale pour le puits D007 24
Figure 13 : Détail de la variation des constantes élastiques en fonction de la profondeur pour le puits
D007 entre 2260 et 2540m
Figure 14 : Variation de la densité de la boue de forage en fonction de la profondeur pour chacun des
puits étudiés
Figure 15 : Variation du gradient de la pression de fluide en fonction de la profondeur et des
assemblages stratigraphiques considérés 30
Figure 16 : Détail de l'évolution de la contrainte principale horizontale minimale en fonction de la
profondeur pour le puits D014 entre 700 et 970m 33
Figure 17 : Détail de l'évolution de la contrainte horizontale minimale en fonction de la profondeur pour
le puits D007 entre 2260 et 2540m 34

Figure 18a : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur pour la Formation de	
Vauréal pour le puits D014	. 38
Figure 18b : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur pour les formations	
d'English Head, de Macasty et de Mingan pour le puits D014	. 39
Figure 19 : Carte de localisation des transects examinés	. 41
Figure 20 : Variation des propriétés mécaniques le long du transect nord-sud	. 42
Figure 21 : Variation des propriétés mécaniques le long du transect ouest-est	. 43
Figure 22 : Variation des propriétés mécaniques de part et d'autre de la Faille de Jupiter	44

# Liste des annexes

Annexe 1 : Diagraphies de calibration des ondes P et S à partir des diagraphies non acoustiques	49
Annexe 2 : Diagrammes binaires de calibration des ondes P et S à partir des diagraphies non	
acoustiques	60
Annexe 3 : Diagraphies brutes et synthétiques	79
Annexe 4 : Diagrammes binaires des modules élastiques	90
Annexe 5 : Diagraphies des paramètres géomécaniques	100

## Résumé

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une étude plus vaste initiée par la Commission géologique du Canada, division Québec (CGC-Québec), et qui porte sur l'évaluation des paramètres géomécaniques de la Formation de Macasty et de sa succession couverture sur l'Ile d'Anticosti afin de mieux comprendre leurs variabilités spatiales et leurs contrôles.

Cette étude a permis de préciser les propriétés géomécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture à l'échelle régionale de l'Ile d'Anticosti, à partir des données diagraphiques des forages pétroliers et gaziers disponibles sur l'île et par calibration avec les données d'un puits de référence, le puits Pétrolia/Corridor, Anticosti, Chaloupe No. 1 (D020). Ce puits est en effet le seul de l'île pour lequel une diagraphie acoustique de l'onde S est disponible à l'heure actuelle, et en l'absence de données de laboratoire cette diagraphie est nécessaire pour établir les différents paramètres géomécaniques.

Une série de tests de calibration a donc été réalisée dans un premier temps afin de déterminer la meilleure méthode pour générer une diagraphie acoustique synthétique de l'onde S pour chacun des puits analysés. Sur la base des données régionales disponibles et des paramètres nécessaires aux calibrations, huit forages pétroliers et gaziers ont été retenus pour l'étude géomécanique régionale.

À l'échelle du puits les résultats mettent en évidence la présence de contrastes mécaniques nets entre la Formation de Macasty et les formations sus- et sous-jacentes. Dans un contexte de fracturation hydraulique ces contrastes mécaniques se traduisent par l'existence de barrières à la propagation des fractures hydrauliques hors de la Formation de Macasty. Par ailleurs l'analyse de deux puits situés de part et d'autre d'une faille régionale, la Faille de Jupiter, révèle que la proximité de la faille n'affecte pas significativement les propriétés mécaniques de la couverture.

À l'échelle régionale les résultats obtenus font preuve d'une remarquable homogénéité d'un puits à l'autre, sauf dans la partie centre-sud de l'île où une barrière à la fracturation est identifiée plus haut dans la couverture plutôt qu'immédiatement au-dessus de la Formation de Macasty. Dans ce cas précis le phénomène peut-être réel ou correspondre à un artefact lié aux limitations méthodologiques de l'étude, sans qu'il soit possible de trancher sur la base des données actuellement disponibles.

Les calibrations nécessaires à cette étude reposent sur la diagraphie acoustique brute de l'onde S du seul puits D020. Dans le futur il est donc recommandé de confirmer la robustesse de la méthode et des résultats présentés ici en les comparant aux données qui pourront être éventuellement collectées dans de nouveaux forages.

Dans la perspective de l'exploration et de l'exploitation des réservoirs non conventionnels sur l'Ile d'Anticosti il apparaît aussi particulièrement souhaitable d'examiner l'incidence que peuvent avoir les discontinuités structurales – failles interprétées en sismique et réseaux de fractures naturelles documentés en surface – sur l'intégrité de la couverture de la Formation de Macasty.

## Summary

This project is part of a larger study initiated by the Geological survey of Canada, Quebec section (GSC-Quebec), and which deals with the evaluation of the geomechanical parameters of the Macasty Formation and its caprock on Anticosti Island to better understand their spatial variability and their controls.

This study enabled to document the geomechanical properties of the Macasty Formation and its caprock at a regional scale on Anticosti Island, based on the available petrophysical logs from the oil and gas wells drilled on the island and through a calibration with data from a reference well, the well Petrolia/Corridor, Anticosti, Chaloupe No. 1 (D020). This well is the only one on the island for which an acoustic log of the S wave is available at the present time, and in the absence of laboratory data this log is required to establish the various geomechanical parameters.

A series of calibration tests was conducted in a first time so as to determine the best method to generate a synthetic acoustic log of the S wave for each of the wells considered. On the basis of the available regional data and the parameters required for the calibrations, eight oil and gas wells were selected for the regional geomechanical study.

At the scale of the well, the results highlight the presence of clear mechanical contrasts between the Macasty Formation and the overlying and underlying formations. In a context of hydraulic fracturing these mechanical contrasts are reflected in the existence of barriers to the propagation of hydraulic fractures outside the Macasty Formation. Furthermore, the analysis of two wells located on both sides of a regional-scale fault, the Jupiter Fault, reveals that the vicinity of the fault does not affect significantly the mechanical properties of the caprock.

At a regional scale the results demonstrate a remarkable homogeneity from a well to another, except in the South-central part of the island where a barrier to the hydraulic fractures is identified stratigraphically higher in the caprock rather than immediately above the Macasty Formation. In this specific case the phenomenon can be real or correspond to an artifact related to methodological limitations of the study, and it is not possible to decide on the basis of currently available data.

The calibrations necessary for this study are based on the raw acoustic log of the S-wave of the sole well D020. Therefore, in the future it is recommended to confirm the robustness of the method and the results presented here by comparing them with data which may be eventually collected in new wells.

In the scope of exploration and exploitation of unconventional reservoirs on Anticosti Island it is also particularly desirable to examine the impact that may have structural discontinuities – faults interpreted on seismic and natural fractures networks documented at surface – on the integrity of the caprock of the Macasty Formation.

# Liste des abréviations

#### Abréviations dans le texte

BRIT :	Indice acoustique de fragilité (0 à 100)
CGC :	Commission Géologique du Canada
DFIT :	Test d'injection (diagnostic formation injectivity test)
DST :	Essai aux tiges (drill stem test)
Ε:	Module de Young (exprimé en GPa)
FIT :	Test d'intégrité (formation integrity test)
g :	Constante d'accélération gravitaire (9,806 x 10 <sup>-3</sup> kPa/m)
GPa :	Gigapascals
ISIP :	Pression à la fermeture initiale (initial shut-in pressure) (exprimée en GPa)
КВ:	Kelly bushing (table de rotation de la foreuse)
kPa :	Kilopascals
LOT :	Test d'épanchement ( <i>leak off test</i> )
LT :	Test de limite ( <i>limit test</i> )
PB:	Poids de la boue de forage (exprimé en kg/m <sup>3</sup> )
Pf:	Pression de fluide ou son gradient (exprimés en kPa ou kPa/m)
PV :	Profondeur verticale
Shmin :	Contrainte principale horizontale minimale ou son gradient (exprimés en GPa ou kPa/m)
Sv:	Pression lithostatique ou son gradient (exprimés en kPa ou kPa/m)
บ (nu) :	Coefficient de Poisson (sans unité)

#### Abréviations des diagraphies

BRIT (0 à 100) :	Indice acoustique de fragilité (brittleness index)
CALI et HCAL_D0xx (mm) :	Diamétreur ( <i>caliper</i> )
DPHI_LIM (V/V) :	Porosité de densité, matrice calcaire
DT, DTP et DTCO (µsec/m) :	Inverse de la vitesse de l'onde P dérivée des données brutes
DTP_xxxxxx (µsec /m) :	Inverse de la vitesse de l'onde P dérivée des données synthétiques
DTS et DTSM (µsec /m) :	Inverse de la vitesse de l'onde S dérivée des données brutes
DTS_xxxxxx (µsec /m) :	Inverse de la vitesse de l'onde S dérivée des données synthétiques
GR (GAPI) :	Rayonnement gamma total
GR_SURF (GAPI) :	Rayonnement gamma total (coffrage de surface)
ILS2 (ohm/m) :	Résistivité peu profonde
ILM2 (ohm/m) :	Résistivité à profondeur moyenne
ILD2 (ohm/m) :	Résistivité profonde
NPOR_LIM (V/V) :	Porosité neutron, matrice calcaire
PEF (b/e) :	Potentiel photoélectrique
PF (kPa) :	Pression de fluide
PR (0 à 0,5) :	Coefficient de Poisson (Poisson's ratio)
RHOB et RHOZ (kg/m <sup>3</sup> ) :	Densité totale
SH_MIN (GPa) :	Contrainte principale horizontale minimale
SH_MIN (kPa) :	Gradient de la contrainte principale horizontale minimale
SPHI (V/V) :	Porosité acoustique
SV (kPa) :	Contrainte principale verticale
TNPH_LIM (V/V) :	Porosité neutron, matrice calcaire (coffrage de surface)
VPVS :	Rapport (sans unité) des vitesses des ondes P et S
YM (GPa) :	Module de Young (Young's modulus)

#### **1. Introduction**

#### 1.1 Contexte de l'étude

Ce projet a été réalisé à la demande de la Commission géologique du Canada, division Québec (CGC-Québec), et s'inscrit dans le cadre d'une étude plus vaste portant sur l'évaluation des paramètres géomécaniques de la Formation de Macasty et de sa succession couverture sur l'Ile d'Anticosti (figure 1) afin de mieux comprendre leurs variabilités spatiales et leurs contrôles (programme de financement PERD).

Les résultats de l'étude doivent ainsi permettre de supporter des études récentes menées par la CGC-Québec sur l'Ile d'Anticosti et aux lles Mingan, en particulier celles portant sur l'analyse des réseaux de fractures naturelles exposés en surface et sur l'interprétation de lignes sismiques.

La documentation récente sur l'Ile d'Anticosti d'une remontée de saumures et d'hydrocarbures à proximité de la faille régionale de Jupiter (Daoust et al., 2014; Clark et al., 2015) suggère que localement des migrations sont possibles à partir de la sous-surface, soulevant l'hypothèse que la proximité de certaines failles peut influencer les propriétés géomécaniques de la couverture rocheuse.



Figure 1 : Carte géologique simplifiée de l'Ile d'Anticosti indiquant la localisation des forages pétroliers et gaziers.

Fond cartographique : Thériault (2002) et SIGPEG (2015). Le tracé de la Faille de Jupiter est tiré de Bédard et al. (2014).

#### 1.2 Objectifs du projet

L'objectif général de cette étude est d'estimer les propriétés géomécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture à l'échelle régionale, à partir des données diagraphiques des forages pétroliers et gaziers disponibles sur l'Ile d'Anticosti.

Pour arriver à cette fin un enregistrement diagraphique acoustique de l'onde S est nécessaire pour chacun des puits examinés. À l'heure actuelle une telle diagraphie n'est disponible que pour le puits Pétrolia/Corridor, Anticosti, Chaloupe No. 1 (D020) mais il est possible de simuler cette diagraphie acoustique de l'onde S à partir d'autres diagraphies disponibles pour le même puits (Séjourné, 2015). Un objectif intermédiaire de la présente étude consiste donc à générer des diagraphies synthétiques de l'onde S pour chacun des puits examinés.

Une fois définies ces diagraphies acoustiques synthétiques il devient alors possible d'estimer les modules élastiques (module de Young, coefficient de Poisson). Un indice de fragilité est également dérivé de ces propriétés afin de rendre compte plus aisément des variations qualitatives fines que l'on observe dans la stratigraphie mécanique de la Formation de Macasty et de sa couverture. Enfin les données de pression disponibles pour les puits étudiés sont analysées pour évaluer semi-quantitativement les variations de la contrainte principale horizontale minimale et pour identifier, le cas échéant, d'éventuelles barrières à la propagation des fractures hydrauliques.

#### 1.3 Portée et limitations de l'étude

Dans un contexte de fracturation hydraulique la pression exercée par le fluide de fracturation vise à initier et propager des fractures dans un médium initialement dépourvu de fractures naturelles, ainsi qu'à rouvrir des fractures préexistantes. Les modules élastiques estimés dans le cadre de la présente étude permettent d'apprécier le comportement de la roche dans le premier cas, c'est-à-dire en considérant la roche comme un médium homogène et isotrope. Il s'agit là d'une simplification nécessaire dans la mesure où les données disponibles ne permettent pas pour le moment de caractériser avec précision l'hétérogénéité et le degré d'anisotropie de la Formation de Macasty et de sa couverture. La contrainte principale horizontale minimale donne quant à elle une idée de la facilité avec laquelle certaines fractures seront ouvertes ou réactivées. Dans le cas de fractures naturelles cimentées la valeur de la contrainte principale horizontale minimale seule ne suffit plus à apprécier la facilité avec laquelle les veines seront réactivées et un paramètre supplémentaire doit être pris en compte, soit le coefficient de cohésion interne du ciment qui scelle les veines. Ce coefficient ne peut être estimé qu'à partir de données de laboratoires, qui ne sont pas disponibles dans le cadre de la présente étude.

Idéalement des diagraphies acoustiques synthétiques des ondes P et S devraient être générées en préalable à l'étude proprement dite afin d'éliminer ou minimiser les effets de trou et les effets de gaz qui peuvent perturber le signal acoustique brut enregistré dans les puits (Séjourné, 2015). En pratique cette étape n'a pu être réalisée ici faute d'une diagraphie brute de l'onde S enregistrée en même temps que les autres diagraphies : la diagraphie synthétique de l'onde S qui est générée pour chacun des puits étudiés est destinée à simuler une diagraphie brute de l'onde S (autrement non disponible), non pas à produire une diagraphie synthétique affranchie des possibles effets de trou et effets de gaz mentionnés précédemment. Parce que cette diagraphie synthétique de l'onde S brute est obtenue par calibration à une ou plusieurs diagraphies non acoustiques disponibles pour le même puits, et parce que la validité de la calibration est vérifiée par corrélation avec le comportement de l'onde P. Au contraire de Séjourné (2015) il n'est plus possible de générer une nouvelle diagraphie synthétique de l'onde S à partir de la première et qui serait destinée à s'affranchir des effets de trou sans donner un poids statistique exagéré

à la diagraphie non acoustique utilisée au départ et sans créer un raisonnement circulaire qui produirait des résultats dénués de sens. Les résultats qui sont présentés ici doivent donc être considérés de manière uniquement qualitative et l'interprétation ne doit porter que sur les seules variations relatives des propriétés mécaniques le long du profil de chaque puits – variations verticales, d'une formation à l'autre ou au sein d'une même formation.

Cette limitation quantitative fondamentale pourra être palliée dans le futur par l'enregistrement de diagraphies acoustiques de l'onde S et par la calibration des données à des analyses de laboratoire (propriétés mécaniques statiques). En attendant que de telles données deviennent disponibles, l'essentiel des résultats et des conclusions élaborés dans le cadre de la présente étude reposent donc sur la qualité des diagraphies brutes, sur la représentativité des diagraphies synthétiques générées à partir de celles-ci, et sur le postulat que les relations de calibration définies à partir du puits D020 peuvent être généralisées et appliquées à l'échelle régionale. L'interprétation des résultats qui est proposée à la fin de l'étude montre clairement les limites géologiques de ce postulat, dont l'application devrait être restreinte à des régions géologiques pour lesquelles notamment le degré de maturité thermique de la matière organique est comparable.

Enfin il convient de rappeler que les résultats présentés ici sont de nature qualitative et relative et ne sauraient être utilisés à des fins de planification d'une campagne de fracturation hydraulique sur le terrain.

#### 2. Intégration des données

#### 2.1 Données diagraphiques

Dix forages pétroliers et gaziers ont été retenus pour l'étude régionale, soit les puits D005, D007, D010, D012, D013, D014, D015, D016 et D018 ainsi que le puits de référence D020. Parmi ces dix forages, la couverture diagraphique des puits D005 et D010 est lacunaire et ne permet qu'une étude partielle. Huit autres puits forés sur l'île ont été exclus de l'étude soit parce qu'ils ne comportaient pas de diagraphies, soit parce que la qualité ou la couverture des diagraphies enregistrées n'était pas satisfaisante. L'ensemble des puits étudiés est localisé à la figure 1.

Pour les fins de l'étude, les diagraphies dans leur format numérique LAS ont été intégrées. La liste des diagraphies disponibles est compilée dans Bédard et al. (2014). Dans le cas des puits D005 et D007 les courbes GR (et ILD2 pour D007) ont du être décalées au préalable pour coïncider avec la courbe DTP brute (3,048m pour GR pour D005; 1,0m et 4,0m pour GR et ILD2 respectivement pour D007). Par ailleurs des relevés de déviation sont disponibles pour certains puits seulement et dans tous les cas la déviation est minime, de sorte que les puits sont considérés verticaux pour les fins de l'étude. Les abréviations correspondant aux différentes diagraphies mentionnées dans ce rapport sont explicitées dans la section « Liste des abréviations ».

#### 2.2 Rapports de fin de forage

Les rapports de fin de forage (SIGPEG, 2015) permettent de compléter les données disponibles pour les puits considérés. Ces rapports comportent notamment les informations suivantes :

- Les minutes de forage,
- le rapport quotidien de forage,
- la description des déblais de forage,
- le log géologique présentant également les indices de gaz et la vitesse de pénétration du trépan,
- le poids de la boue de forage,
- les relevés de déviation,
- les résultats d'éventuels essais aux tiges (DST) et
- les résultats d'éventuels tests d'épanchement (LOT), d'intégrité (FIT) ou d'injection (DFIT).

#### 2.3 Définition des contacts stratigraphiques

Le cadre stratigraphique de l'Ile d'Anticosti est relativement simple et bien établi (figure 2), mais quelques ambiguïtés demeurent quant à la terminologie employée pour décrire certaines unités stratigraphiques (Séjourné, 2015). Pour les puits considérés dans cette étude, une révision de la terminologie et des contacts stratigraphiques est proposée dans Bédard et al. (2014) sur la base des contrastes pétrophysiques observés. La comparaison entre les profils diagraphiques et les profondeurs des toits de formation proposées dans Bédard et al. (2014) confirme que les contacts stratigraphiques proposés par ces auteurs sont appropriés pour la présente étude et qu'il n'y a pas lieu de les ajuster de manière significative dans cette étude. Quelques modifications ont du être apportées cependant aux définitions de Bédard et al. (2014) pour des fins d'homogénéité entre les différents forages considérés et avec les travaux antérieurs réalisés pour le puits D020 – voir notamment la discussion relative à l'usage de la Formation d'English Head dans Séjourné (2015). Les contacts utilisés dans le cadre de la présente étude sont compilés au tableau 1.

Tableau 1 : Profondeurs établies pour le toit des formations dans les puits considérés dans le cadre de la présente étude. Une case vide signifie l'absence de cette unité.

Formation	Sommet (mKB)										
Formation	D005	D007	D010	D012	D013	D014	D015	D016	D018	D020	
Gun River		4	14	5	6					5	
Merrimack		655		287	77					49	
Becsie, Ellis Bay, Vauréal supérieur	14	676		305	102	5	5	5	5	66	
Vauréal inférieur	641	1602		1062	842	523	497	490	284	639	
English Head supérieur				1424	960	625	610	633	390	755	
English Head inférieur		2317		1478	1125	769	750	735	450	910	
Macasty	851	2406		1640	1236	879	849	904	524	1034	
Mingan	887	2491	954	1699	1252	917	885	919	564	1080	

Les profondeurs présentées ici correspondent aux profondeurs apparentes (mesurées) et sont assimilées aux profondeurs réelles (verticales) en l'absence de déviation significative.





Les unités exposées en surface comprennent les formations de Chicotte à Vauréal (figure 1). Les unités plus anciennes (formations de Macasty à Romaine) ne sont connues sur l'île que par les forages pétroliers et gaziers. Source : Pinet et al. (2015).

#### 3. Définition des diagraphies acoustiques synthétiques de l'onde S

#### 3.1 Méthodologie générale

Seul le puits D020 comporte un enregistrement de l'onde S. Une série de diagrammes binaires est donc réalisée pour ce puits afin de confirmer qu'il existe une corrélation entre les diagraphies acoustiques (ondes P et S) et certaines diagraphies non acoustiques. Des diagraphies acoustiques synthétiques sont alors générées pour le même puits D020 sur la base de ces corrélations.

Chaque diagraphie synthétique des ondes P et S est ensuite comparée à la diagraphie brute du puits D020 afin de vérifier que la relation observée pour l'onde P (seule disponible pour les autres puits) est aussi valide pour l'onde S et obéit aux mêmes lois de calibration.

Les relations qui permettent une bonne corrélation entre les diagraphies brutes et synthétiques pour le puits D020 sont identifiées et retenues pour être appliquées aux autres puits. La pertinence de transposer ces relations aux autres puits est validée puits par puits en comparant les diagraphies brute et synthétique de l'onde P. La relation qui présente le meilleur degré de confiance pour un puits donné est finalement appliquée pour générer une onde S synthétique pour ce même puits.

#### 3.2 Définition des corrélations pour le puits D020

Une série de diagrammes binaires a été réalisée à partir des diagraphies du puits D020 pour identifier les diagraphies non acoustiques qui présentent les meilleures corrélations avec les diagraphies acoustiques. Les intervalles qui présentaient des irrégularités prononcées dans la géométrie du trou de forage, telles qu'indiquées par le diamétreur, ont été expurgés au préalable.

L'essentiel des résultats présentés dans cette section 3.2 sont dérivés des travaux publiés dans Séjourné (2015). La différence réside dans la finalité de la démarche, les diagraphies synthétiques produites ici ayant pour but de simuler les diagraphies brutes en introduisant le moins de modifications possibles, donc sans tenter de corriger le signal acoustique pour tenir compte des possibles effets de trou ou effets de gaz : il s'agit donc ici de reproduire une diagraphie acoustique brute aussi fidèlement que possible, contrairement à la méthode utilisée par Séjourné (2015) qui visait à éliminer les possibles effets de trou et effets de gaz en combinant plusieurs diagraphies non acoustiques. Éliminer ces effets serait souhaitable mais procéderait d'un raisonnement circulaire dans le cas présent parce que la validité de la calibration pour l'onde S est vérifiée par corrélation avec le comportement de l'onde P.

Dans le cas du puits D20 (Séjourné, 2015), une corrélation positive est observée entre les diagraphies acoustiques de l'onde P et de l'onde S (DTCO et DTSM) d'une part, et d'autre par le rayonnement gamma (GR), la porosité neutron (NPOR), la résistivité profonde (ILD2) et la densité totale (RHOB). Les équations de calibration sont présentées au tableau 2.

Les meilleures corrélations sont observées avec le rayonnement gamma et la porosité neutron, à la condition de tenir compte de deux tendances distinctes qui sont individualisées pour, d'une part, les formations de Vauréal, d'English Head supérieur et d'English Head inférieur, et d'autre part les formations de Macasty et de Mingan. Une corrélation satisfaisante entre les diagraphies acoustiques et GR ou NPOR doit donc intégrer deux équations pour définir les diagraphies acoustiques synthétiques selon la profondeur ou la formation considérée (tableau 2). Les figures 3 et 4 illustrent ce phénomène pour le rayonnement gamma. Un résultat similaire est obtenu pour la porosité neutron.

Tableau 2 : Synthèse des corrélations observées entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques déduites du puits D020.

Diagraphies		Équation	R <sup>2</sup>	No.	Formation(s) exclue(s)
	GR	DTCO <sub>GR</sub> = 0,84992527 x GR + 173,4911 DTCO <sub>GR</sub> = 0,83061077 x GR + 144,4634	0,921 0,959	(1A) (2A)	Macasty, Mingan Vauréal, E.E.s., E.E.i.
DTCO	NPOR	DTCO <sub>NPOR</sub> = 306,82817966 x NPOR_LIM + 182,1418 DTCO <sub>NPOR</sub> = 452,63578374 x NPOR_LIM + 151,3529	0,947 0,966	(3A) (4A)	Macasty, Mingan Vauréal, E.E.s., E.E.i.
	RHOB	DTCO <sub>RHOB</sub> = - 0,69771576 x RHOB + 2086,0807	-0,748	(5A)	Macasty
	ILD2	DTCO <sub>ILD2</sub> = 57,84804715 x LOG(ILD2) <sup>2</sup> - 265,68822650 x LOG(ILD2) + 485,70327040	0,849	(6A)	English Head inférieur, Macasty
	GR	DTSM <sub>GR</sub> = 1,40543264 x GR + 338,1799 DTSM <sub>GR</sub> = 1,02812644 x GR + 301,4328	0,840 0,911	(1B) (2B)	Macasty, Mingan Vauréal, E.E.s., E.E.i.
DTSM .	NPOR	DTSM <sub>NPOR</sub> = 506,32103635 x NPOR_LIM + 352,7075 DTSM <sub>NPOR</sub> = 592,43415383 x NPOR_LIM + 306,5381	0,890 0,949	(3B) (4B)	Macasty, Mingan Vauréal, E.E.s., E.E.i.
	RHOB	DTSM <sub>RHOB</sub> = - 1,18174191 x RHOB + 3575,2756	-0,684	(5B)	Macasty
	ILD2	DTSM <sub>ILD2</sub> = 103,35516995 x LOG(ILD2) <sup>2</sup> - 478,20003070 x LOG(ILD2) + 896,39541622	0,875	(6B)	English Head inférieur, Macasty

E.E.s. : Formation d'English Head supérieur; E.E.i. : Formation d'English Head inférieur. Source : Séjourné (2015).

La résistivité (ILD2) est affectée par l'effet de gaz ou la présence de matière organique dans les formations d'English Head inférieur et de Macasty, de sorte qu'il n'est pas possible d'établir une corrélation satisfaisante entre les diagraphies acoustiques et ILD2 pour ces deux formations. ILD2 demeure toutefois un outil de corrélation valide pour les autres formations (figure 5). Enfin les corrélations établies avec la densité totale (RHOB) présentent souvent des résultats beaucoup plus variables et moins précis qu'avec les diagraphies GR, NPOR et ILD2 et sont affectés par la présence de matière organique dans la Formation de Macasty (figure 6).

Parce que l'épaisseur des formations de Vauréal ou de Mingan est de beaucoup supérieure à celle des formations d'English Head ou de Macasty (tableau 1), les valeurs caractéristiques des premières sont surreprésentées et ont un poids statistique excessif par rapport aux secondes de sorte que le recours au seul outil statistique ne suffit pas à valider une corrélation avec les diagraphies acoustiques. La signification du coefficient de régression (R<sup>2</sup>) défini par les diagrammes binaires est donc confirmée visuellement par l'examen systématique des courbes des diagraphies (figures 7a et 7b).



Figure 3 : Exemple de corrélation observée entre les diagraphies acoustiques brutes (ici DTCO) et de rayonnement gamma (GR) pour le puits D020.

Deux tendances se distinguent clairement, l'une pour les formations de Vauréal et d'English Head supérieur et inférieur, l'autre pour les formations de Macasty et Mingan. Un résultat comparable est obtenu à partir de la diagraphie de porosité neutron. Dans ce diagramme binaire et les suivants le code de couleurs utilisé est explicité dans l'échelle à droite du diagramme, de même, le coefficient de corrélation R<sup>2</sup> est donné dans le tableau 2.



Figure 4 : Exemple de diagramme binaire permettant de vérifier la validité des corrélations établies pour le puits D020.

À titre d'exemple le diagramme illustre la corrélation obtenue entre la diagraphie acoustique brute de l'onde P (DTCO) et son équivalent synthétique établi en combinant les deux corrélations observées pour le rayonnement gamma (DTP\_GR\_ALL) selon les équations définies au tableau 2. Un résultat comparable est obtenu à partir de la diagraphie de porosité neutron tel qu'illustré dans Séjourné (2015).



Figure 5 : Exemple de corrélation observée entre les diagraphies acoustiques (ici DTCO) et de résistivité profonde (ILD2) pour le puits D020.

Les formations de Macasty (en jaune) et d'English Head inférieur (en vert) doivent être exclues de la corrélation pour obtenir des résultats acceptables. Figure tirée de Séjourné (2015).



Figure 6 : Exemple de corrélation observée entre les diagraphies acoustiques (ici DTCO) et de densité totale (RHOB) pour le puits D020.

Bien que la Formation de Macasty ait été exclue de ce diagramme binaire la corrélation demeure faible  $(R^2 = 0,748, tableau 2)$ . La valeur peu élevée de cette corrélation est mise en évidence aux figures 7a et 7b ci-dessous.

	and the state of	CALI [MM] 200 250 GR [GAPI]
		DTS_RHOB [US/M] 600 300 DTSM [US/M]
-		DTP_RHOB [US/M] 300 150 DTCO [US/M]
	fred from a grant for say and again the second for the second second second second second second second for the	DTS_ILD2 [US/M] 600 300 DTSM [US/M] 600 200
S.	A sample of the second s	DTP_ILD2 [US/M] 300 150 DTCO [US/M]
	operations and every superior of the free particular interesting and the free free free free free free free fr	DTS_GR_ALL [US/M] 600 300 DTSM [US/M] 200 200
	Must me and we will be a superior of the second statement of the second statement of the second statement of the	DTP_GR_ALL [US/M] 300 150 DTCO [US/M] 200 150
-	Aprest house respective respective and the frequence of the second second second rest of the second s	TS_NPOR_ALL [US/I 600 300 DTSM [US/M] 600 200
	Marth manuscription who was a feature of the second of the	TP_NPOR_ALL [US/N 300 150 
	Vauréal supérieur	1

Figure 7a : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le puits D020 entre 150 et 650m.

Les diagraphies brutes (DTCO pour l'onde P, DTSM pour l'onde S) sont représentées en noir, les diagraphies synthétiques de l'onde S en vert (DTS\_RHOB, DTS\_ILD2, etc.) et celles de l'onde P en bleu (DTP\_RHOB, DTP\_ILD2, etc.). L'intervalle manquant au-dessus du toit de la Formation de Vauréal inférieur correspond à une zone perturbée préalablement filtrée. On note une corrélation médiocre avec RHOB, bonne avec ILD2, GR et NPOR. Dans tous les cas la diagraphie synthétique de l'onde S suit les mêmes lois de calibration que la diagraphie synthétique de l'onde P.



Figure 7b : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le puits D020 entre 650 et 1125m.

Les diagraphies brutes (DTCO pour l'onde P, DTSM pour l'onde S) sont représentées en noir, les diagraphies synthétiques de l'onde S en vert et celles de l'onde P en bleu. On note une corrélation médiocre avec RHOB particulièrement dans la Formation d'English Head inférieur en raison de la présence de nombreux niveaux de calcaire (voir Séjourné, 2015) ainsi que dans la Formation de Macasty en raison de la présence de matière organique. On note en revanche une bonne corrélation avec ILD2 sauf pour les formations d'English Head inférieur et de Macasty (effet de gaz et présence de matière organique), et une bonne corrélation également pour l'ensemble du puits avec GR et avec NPOR. Dans tous les cas la diagraphie synthétique de l'onde S suit les mêmes lois de calibration que la diagraphie synthétique de l'onde S suit les mêmes lois de calibration que la diagraphie synthétique de l'onde S sont en réalité supérieures à 150 GAPI et ont simplement été reportées à l'autre extrémité de la colonne pour permettre au lecteur d'apprécier l'évolution de cette courbe.

#### 3.3 Diagraphies synthétiques de l'onde S pour les autres puits

En utilisant les relations établies précédemment pour le puits D020, une série de diagraphies synthétiques des ondes P et S a ensuite été préparée de manière systématique et pour tous les puits anciens qui présentaient une suite diagraphique satisfaisante, soit les puits D005, D007, D010, D012, D013, D014, D015, D016 et D018 (figure 1).



Figure 8a : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le puits D014 entre 0 et 550m.

Les diagraphies brutes (DTCO pour l'onde P, DTSM pour l'onde S) sont représentées en noir, les diagraphies synthétiques de l'onde S en vert et celles de l'onde P en bleu. Comme dans le cas du puits D020 (figure 7a) on note une corrélation médiocre avec RHOB, bonne avec ILD2, GR et NPOR. Dans tous les cas la diagraphie synthétique de l'onde S suit les mêmes lois de calibration que la diagraphie synthétique de l'onde P.



Figure 8b : Résultats des relations établies entre les diagraphies acoustiques et non acoustiques dans le puits D014 entre 0 et 550m.

Les diagraphies brutes (DTCO pour l'onde P, DTSM pour l'onde S) sont représentées en noir, les diagraphies synthétiques de l'onde S en vert et celles de l'onde P en bleu. Comme dans le cas du puits D020 on note une corrélation médiocre avec RHOB particulièrement dans la Formation d'English Head inférieur en raison de la présence de nombreux niveaux de calcaire et dans la Formation de Macasty en raison de la présence de matière organique, une bonne corrélation avec ILD2 sauf pour les formations d'English Head inférieur et de Macasty (effet de gaz et présence de matière organique), et également une bonne corrélation pour l'ensemble du puits avec GR et avec NPOR. Dans tous les cas la diagraphie synthétique de l'onde S suit les mêmes lois de calibration que la diagraphie synthétique de l'onde P.

La diagraphie synthétique de l'onde P est comparée graphiquement à la diagraphie brute pour vérifier la qualité de la corrélation pour chaque puits. À titre d'exemple les résultats obtenus pour le puits D014 sont présentés aux figures 8a et 8b. La diagraphie acoustique synthétique de l'onde P générée à partir de la densité totale (DTP<sub>RHOB</sub>) dans ce puits suit dans l'ensemble les variations de la diagraphie brute (DTCO) mais présente une variabilité importante. DTP<sub>ILD2</sub> présente une bonne corrélation avec DTCO sauf pour les formations d'English Head inférieur et de Macasty. DTP<sub>GR</sub> est la diagraphie synthétique qui présente la meilleure corrélation avec DTCO (figure 9). DTP<sub>NPOR</sub> enfin, présente aussi une bonne corrélation avec DTCO mais avec un degré de fidélité moindre que dans le cas de DTP<sub>GR</sub>. La méthode retenue ici pour générer une diagraphie synthétique de l'onde S pour le puits D014 est donc dérivée de GR.



Figure 9 : Diagramme binaire permettant de vérifier la validité de la corrélation établie pour la diagraphie acoustique de l'onde P dans le puits D014.

La corrélation retenue est celle établie avec la diagraphie de l'onde P brute (ici DT) à partir du rayonnement gamma (DTP\_SYNTH) en combinant les deux corrélations observées pour GR selon les équations (1A) et (2A) définies au tableau 2. La corrélation est bonne pour toutes les formations sauf pour une partie de la Formation de Mingan. L'examen de la figure 8b révèle que c'est la partie inférieure de cette unité qui ne respecte pas les lois de calibration retenues ici, la partie supérieure, au contact avec la Formation de Macasty, présente au contraire une bonne corrélation.

Ces observations sont également vérifiées dans la plupart des autres puits et il appert que la calibration à partir du rayonnement gamma (GR) avec deux intervalles distincts est celle qui présente en général les meilleurs résultats. La résistivité profonde (ILD2) est aussi parfois utilisée en remplacement, dans le cas des puits D007 et D010. Les relations qui sont retenues pour chacun des puits sont détaillées ci-dessous dans le cas de DTP (DTS suit les mêmes règles). Les numéros entre parenthèses réfèrent aux équations du tableau 2 :

- D005 : Décalage de GR de -3,048m
  - Corrélation avec GR (1) de 0 à 851m
  - Corrélation avec GR [(1) + (2)] / 2 de 851 à 1114m
  - Corrélation avec GR (2) de 1114m à la profondeur totale
- D007 : Décalage de GR de +4,0m
  - Décalage de ILD2 de +1,0m
  - Corrélation avec ILD2 (5) de 0 à 2317m
  - (Remarque : Possible erreur d'instrument pour DTP brut de 1515 à 1610m)
  - Corrélation avec GR (2) de 2317 à 2491m
  - Corrélation avec ILD2 (5) de 2491m à la profondeur totale
- D010 : Corrélation avec ILD2 (5) de 0 à 822m
  - Corrélation avec GR (1) de 822 à 909m
  - Corrélation avec ILD2 (5) de 909 à 1045m
  - (Remarque : Pas de données fiables de 1045m à la profondeur totale)
- D012 : Corrélation avec ILD2 (5) de 0 à 1000m
  - Corrélation avec NPOR (3) de 1000 à 1640m
  - Corrélation avec NPOR (4) de 1640m à la profondeur totale
- D013 : Corrélation avec ILD2 (5) de 0 à 1125m
  - Corrélation avec GR (1) de 1125 à 1236m
    - Corrélation avec GR (2) de 1236m à la profondeur totale
- D014 : Corrélation avec GR (1) de 0 à 879m
  - (Remarque : Calibration médiocre pour la Formation d'English Head inférieur)
  - Corrélation avec GR (2) de 879m à la profondeur totale
- D015 : Corrélation avec GR (1) de 0 à 849m
  - Corrélation avec GR (2) de 849m à la profondeur totale
- D016 : Corrélation avec GR (1) de 0 à 904m
  - Corrélation avec GR (2) de 904m à la profondeur totale
  - (Remarque : Calibration médiocre pour la Formation d'English Head inférieur)
- D018 : Corrélation avec GR (1) de 0 à 450m
  - Corrélation avec RHOB (6) de 450 à 524m
    - (Remarque : DTP<sub>RHOB</sub> suit les variations de DTP brut mais les valeurs extrêmes sont amplifiées)
  - Corrélation avec GR (1) de 524m à la profondeur totale

#### 4. Estimation des propriétés mécaniques

#### 4.1 Constantes élastiques et indice de fragilité

Le coefficient de Poisson (u), le module de Young (E) et l'indice acoustique de fragilité (BRIT) ont été estimés pour chaque puits à partir de la diagraphie acoustique brute de l'onde P (DTP), de la diagraphie acoustique synthétique de l'onde S définie précédemment (DTS\_SYNTH) et de la densité totale (RHOB) selon les équations (7) à (9) ci-dessous.

Coefficient de Poisson 
$$(v) = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\text{DTS}_{\text{SYNTH}}}{\text{DTP}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\text{DTS}_{\text{SYNTH}}}{\text{DTP}}\right)^2 - 1}$$
 (7)

Module de Young (E) = 2 
$$\frac{\text{RHOB} \times 10^3}{\text{DTS}_{\text{SYNTH}^2}}(1+v)$$
 (8)

$$BRIT = \frac{1}{2} \left( 100 \ \frac{v - v_{\max}}{v_{\min} - v_{\max}} + \ 100 \ \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \right)$$
(9)

La signification physique de ces paramètres est discutée dans Séjourné (2015). En l'absence de données de laboratoire, les propriétés mécaniques des unités rencontrées dans chacun des puits étudiés sont considérées comme des paramètres dynamiques non calibrés. La diagraphie de densité totale (RHOB) n'est pas disponible pour les puits D005 et D010 de sorte que seul le coefficient de Poisson a été estimé pour ces puits. L'ensemble des constantes élastiques a été calculé pour tous les autres puits et les figures 10 et 11 illustrent les résultats pour le puits D014 à titre d'exemple. Des résultats comparables sont obtenus pour les puits D012, D013, D015, D016 et D018. Seuls les résultats obtenus pour le puits D007 diffèrent des autres. Pour ce puits les coefficients de Poisson sont plus élevés et plus variables (figure 12) et l'indice acoustique de fragilité est plus élevé pour la Formation d'English Head inférieure que pour les formations de Macasty et d'English Head supérieur (figure 13) contrairement aux autres puits. Les résultats pour tous les puits sont compilés aux tableaux 3a et 3b et présentés graphiquement en annexe.



Figure 10 : Diagramme binaire opposant les valeurs dynamiques de E et v estimées à partir des diagraphies acoustiques et de densité totale pour le puits D014.

Des résultats comparables sont obtenus pour les puits D012, D013, D015, D016 et D018. La dispersion observée pour la Formation de Mingan (en rouge) traduit celle déjà observée pour les diagraphies acoustiques à la figure 9. YM : module de Young (E), exprimé en GPa; PR : coefficient de Poisson (u), sans unité.



Figure 11 : Détail de la variation des constantes élastiques en fonction de la profondeur pour le puits D014 entre 700 et 970m.

Des résultats comparables sont obtenus pour les puits D012, D013, D015, D016 et D018. Les propriétés sont calculées à partir de la diagraphie acoustique brute de l'onde P (DTCO), de la diagraphie acoustique synthétique de l'onde S (DTS\_SYNTH) et de la densité totale (RHOZ). DTS\_SYNTH est dérivée des relations définies précédemment et la qualité de ces relations est vérifiée en comparant DTCO (brute) à la diagraphie acoustique synthétique de l'onde P (DTP\_SYNTH) dérivée des mêmes relations.



Figure 12 : Diagramme binaire opposant les valeurs dynamiques de E et v estimées à partir des diagraphies acoustiques et de densité totale pour le puits D007.

Les coefficients de Poisson estimés pour ce puits sont plus élevés et plus variables que ceux des autres puits (figure 10). YM : module de Young (E), exprimé en GPa; PR : coefficient de Poisson (u), sans unité.



Figure 13 : Détail de la variation des constantes élastiques en fonction de la profondeur pour le puits D007 entre 2260 et 2540m.

Les modules élastiques pour ce puits diffèrent de ceux estimés pour les autres puits (figure 11). En particulier l'indice acoustique de fragilité (BRIT) est plus élevé pour la Formation d'English Head inférieur que pour les formations de Macasty et d'English Head supérieur.

Tableau 3a : Synthèse des modules élastiques estimés pour les puits étudiés pour les formations de Vauréal, d'English Head supérieur et d'English Head inférieur.

D020b : valeurs obtenues à partir des diagraphies brutes; D020s : valeurs obtenues à partir des diagraphies synthétiques (Tiré de Séjourné, 2015). Pour tous les autres puits, les valeurs sont estimées à partir de l'onde P brute et de l'onde S synthétique.

		Module de Young (GPa)				Coe	efficient	de Pois	son	Indice de fragilité			
Unité	Puits	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum
	D007	16,2	39,1	8,1	62,0	0,00	0,31	0,04	0,43	8,7	40,4	10,9	99,4
	D010	20,6	33,2	3,3	61,8	0,00	0,30	0,05	0,40				
	D012	8,8	45,4	9,1	63,8	0,16	0,30	0,02	0,48	0,5	45,7	10,7	65,7
_	D013	16,3	48,2	6,9	62,6	0,01	0,30	0,03	0,43	3,4	48,4	7,4	91,5
réal	D014	30,4	40,9	7,5	82,6	0,09	0,30	0,02	0,37	30,8	41,1	7,6	100,0
/au	D015	31,7	41,0	3,7	53,4	0,10	0,31	0,02	0,38	27,4	39,5	3,5	72,6
	D016	24,2	38,9	6,2	79,2	0,21	0,30	0,03	0,40	18,6	39,3	4,2	75,4
	D018	3,0	33,1	6,2	57,4	0,10	0,29	0,06	0,48	28,9	47,9	8,7	100,0
	D020b	13,9	41,2	7,3	64,4	0,00	0,31	0,02	0,38	0,0	40,9	10,9	100,0
	D020s	2,3	41,5	10,0	61,3	0,16	0,31	0,03	0,32	31,0	58,6	7,0	67,7
	D007						-				-		
<u> </u>	D010												
rieu	D012	21,7	32,3	2,4	37,9	0,27	0,33	0,02	0,39	12,8	28,2	3,9	39,8
iþdr	D013	25,8	36,6	3,7	45,6	0,25	0,31	0,01	0,35	25,7	35,4	3,9	48,4
d sı	D014	27,1	30,7	2,0	37,1	0,21	0,28	0,02	0,34	26,6	35 <i>,</i> 6	3,0	47,8
Неа	D015	26,9	31,3	2,0	38,1	0,23	0,30	0,01	0,34	25,7	32,6	2,9	46,6
sh I	D016	26,9	31,0	1,6	37,0	0,19	0,29	0,02	0,33	27,0	34,5	3,0	50,7
ngli	D018	24,6	31,0	2,9	41,3	0,03	0,25	0,04	0,33	31,9	42,0	3,3	52,6
ш	D020b	23,6	33,6	2,8	54,8	0,18	0,29	0,02	0,35	6,2	37,2	7,5	87,4
	D020s	21,6	33,2	2,0	47,2	0,28	0,30	0,00	0,31	47,3	52,9	1,1	59 <i>,</i> 3
	D007	27,9	33 <i>,</i> 4	1,9	37,4	0,20	0,27	0,02	0,36	25,1	40,2	4,8	50,6
Head inférieur	D010												
	D012	23,9	29,7	1,7	42,4	0,15	0,31	0,02	0,43	3,9	29,4	4,3	70,2
	D013	9,9	30,0	3,5	37,7	0,25	0,32	0,02	0,41	1,2	26,9	5,4	42,9
	D014	23,1	27,1	2,7	45 <i>,</i> 5	0,20	0,27	0,03	0,38	14,0	34 <i>,</i> 4	5,1	49,8
	D015	22,6	27,2	3,7	48,7	0,26	0,31	0,02	0,40	15,1	27,7	4,0	45,3
lish	D016	15,7	26,7	2,9	46,9	0,19	0,30	0,02	0,39	4,5	29,1	5,1	51,3
Eng	D018	16,5	26,3	4,5	55,1	0,06	0,28	0,03	0,35	6,4	31,2	10,2	100,0
	D020b	24,8	30,0	4,0	67,0	0,08	0,28	0,02	0,39	1,3	37,2	9,6	100,0
	D020s	26,7	31,4	4,0	69,3	0,29	0,30	0,00	0,33	49,3	52,3	1,7	66,1

Tableau 3b : Synthèse des modules élastiques estimés pour les puits étudiés pour les formations de Macasty et de Mingan supérieur.

D020b : valeurs obtenues à partir des diagraphies brutes; D020s : valeurs obtenues à partir des diagraphies synthétiques (Tiré de Séjourné, 2015). Pour tous les autres puits, les valeurs sont estimées à partir de l'onde P brute et de l'onde S synthétique.

Unité	Puits	Module de Young (GPa)				Coefficient de Poisson				Indice de fragilité			
		Minimum	Médiane	Déviation	Maximum	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum
Macasty	D007	23,9	29,2	1,8	34,4	0,06	0,29	0,04	0,36	19,3	32,6	6,5	74,0
	D010												
	D012	15,3	31,4	4,1	62,1	0,08	0,24	0,04	0,42	13,7	45,1	8,4	78,1
	D013	19,4	31,4	4,9	49,8	0,02	0,23	0,08	0,45	9,1	46,0	15,1	89,3
	D014	23,2	31,7	4,2	50,6	0,01	0,23	0,04	0,39	19,7	45,9	9,4	85,1
	D015	23,5	32,9	4,2	52,0	0,16	0,23	0,03	0,33	25,0	48,2	6,5	59,2
	D016	28,4	32,1	4,4	55,8	0,03	0,21	0,03	0,30	38,0	50,1	6,3	85,4
	D018	22,9	29,7	3,4	45,0	0,11	0,23	0,03	0,38	21,6	43,3	11,1	98,6
	D020b	22,1	32,6	4,7	48,6	0,02	0,24	0,03	0,35	13,3	55,7	11,8	100,0
	D020s	20,0	26,7	3,4	41,3	0,27	0,29	0,00	0,31	49,9	73,5	1,8	78,1
Mingan supérieur	D007	26,2	42,6	8,5	64,0	0,26	0,34	0,02	0,42	14,2	34,7	8,3	55,0
	D010	30,1	55 <i>,</i> 3	9,1	64,1	0,23	0,30	0,02	0,37				
	D012	12,5	46,5	11,5	74,7	0,03	0,30	0,04	0,41	8,3	48,2	12,2	100,0
	D013	19,5	48,4	10,4	77,4	0,01	0,31	0,04	0,43	7,1	48,2	11,5	100,0
	D014	29,8	56,2	7,9	73,2	0,00	0,28	0,05	0,39	39,7	60,7	9,6	100,0
	D015	30,9	65,9	9,0	73,1	0,17	0,30	0,03	0,35	41,9	61,4	5,4	76,3
	D016	31,6	62,5	9,0	72,8	0,03	0,29	0,04	0,33	44,5	64,4	5,0	88,0
	D018	21,5	49 <i>,</i> 0	10,0	67,3	0,01	0,26	0,06	0,36	27,8	62,2	7,1	100,0
	D020b	27,3	56,3	4,7	67,1	0,27	0,31	0,01	0,38	1,3	59,1	6,1	74,4
	D020s	27,4	56,3	4,7	67,1	0,27	0,31	0,01	0,38	54,9	73,1	1,6	75,8

#### 4.2 Pression de fluide

La pression interne de la formation, ou pression de fluide (Pf), est un paramètre intermédiaire important qui entre dans le calcul de la contrainte principale horizontale minimale. Trois jeux de données indépendants sont disponibles pour estimer cette pression de fluide selon la formation, la profondeur ou le puits considérés, soit : les résultats d'essais aux tiges (DST) réalisés dans les formations de Mingan et de Romaine, les tests d'épanchement (LOT) ou d'intégrité (FIT) réalisés sous la base du coffrage de surface, et la densité de la boue de forage.

#### 4.2.1 Essais aux tiges

Des résultats d'essais aux tiges sont disponibles pour les puits D004, D005, D007 et D014. À partir de ces données un gradient de pression de fluide moyen de 9,94 kPa/m ± 0,88 a été établi pour les formations de Mingan et de Romaine à l'échelle régionale. Le détail de ces données et de ces résultats est présenté dans Séjourné (2015).

#### 4.2.2 Tests d'épanchement et d'intégrité

Pour un certain nombre de puits, en particulier les plus récents, des tests d'épanchement (LOT) ou d'intégrité (FIT) ont été réalisés de manière systématique sous la base du coffrage de surface (tableau 4). Dans certaines conditions ces tests peuvent servir à estimer la pression de fluide ou la pression de fracturation à la profondeur à laquelle le test est réalisé. Dans le cas des tests disponibles ici l'exploitation des résultats s'avère cependant difficile. Certains tests sont en effet identifiés comme des « tests de limite », c'est-à-dire des tests pour lesquels l'injection est stoppée lorsqu'une pression prédéfinie est atteinte : le résultat devrait donc sous-estimer les conditions réelles. Si l'on exclut ces tests de limite, quatre tests d'épanchement demeurent disponibles à partir desquels il est possible de calculer un gradient de pression de fluide pour chacun des puits. Les gradients ainsi calculés varient de 35,48 à 90,79 kPa/m (tableau 4). Une telle variabilité est difficilement explicable dans le contexte géologique de l'île et il est possible que certaines erreurs se soient glissées dans le rapport de ces tests, notamment en ce qui a trait au choix des unités. En l'état actuel des données disponibles il n'est pas possible de déterminer lesquels de ces tests peuvent être retenus et lesquels doivent être rejetés.

Tableau 4 : Synthèse des résultats disponibles pour les tests d'épanchement ou d'intégrité réalisés sous la base du coffrage de surface.

La pression appliquée (à la profondeur à laquelle le test est réalisé) et le gradient de pression sont calculés à partir des données disponibles, soit la pression en surface et la densité de la boue de forage. LOT : test d'épanchement, LT : test de limite, FIT : test d'intégrité.

Puits	Profondeur (mKB)	Pression en surface (kPa)	Densité de la boue (kg/m <sup>3</sup> )	Pression appliquée (kPa)	Gradient de pression (kPa/m)	Type de test
D005	156	3792	1138	5535	35,48	LOT
D012	325	13500	1000	16690	51,35	LOT-LT
D013	255	15000	1000	17503	68,64	LOT-LT
D014	178	4700	1005	6456	36,27	LOT
D015	173	14000	1005	15707	90,79	LOT
D016	175	10700	1000	12418	70,96	LOT
D018	185	500	1000	2316	12,52	FIT-LT

#### 4.2.3 Densité de la boue de forage

La pression de fluide peut être estimée selon une relation simple à partir de la densité de la boue de forage et de la constante d'accélération gravitaire selon la relation exprimée par l'équation (10) :

$$Pf = PB \times g \times PV \tag{10}$$

Avec : Pf = Pression de fluide exprimée en kPa

PB = Poids de la boue de forage exprimé en kg/m<sup>3</sup>

g = constante d'accélération gravitaire (9,806 x 10<sup>-3</sup> kPa/m)

PV = Profondeur verticale exprimée en m

Cette relation est considérée ici comme raisonnable en première approximation à la condition qu'elle soit cohérente avec, et contrainte par, d'autres jeux de données, notamment les essais de pression (la section 4.2.2 a montré que ces résultats n'étaient pas fiables), les venues de gaz et les venues d'eau occasionnelles enregistrées durant le forage, de même que les éventuelles pertes de circulation.

Un tel exercice a déjà été réalisé avec succès dans le cas du puits D020 (Séjourné, 2015). À l'échelle régionale la précision des données varie selon les puits et les informations manquent parfois totalement dans le cas des puits les plus anciens. Pour la plupart des puits étudiés toutefois, on dispose 1) des rapports quotidiens de forage (*daily reports*) indiquant la densité de la boue à la fin de la journée ainsi que d'éventuelles pertes de circulation et indices de gaz notables, 2) des rapports de quart (*tour sheets*) indiquant la densité de la boue de forage à la fin de chaque chiffre au minimum, voire de manière plus précise dans certains cas et 3) d'un log géologique synthétique (*mudlog*) qui recense les indices et les pics de gaz enregistrés. Dans certains cas les rapports quotidiens et les rapports de quart présentent des informations divergentes en ce qui concerne la densité de la boue et les deux jeux de données ont été examinés séparément. Une préférence arbitraire est ici donnée aux valeurs compilées dans les rapports de quart en considérant que le risque d'une erreur de transcription ou d'une simplification excessive est accru dans les rapports quotidiens.

Le gradient de la pression de fluide est dérivé de la densité de la boue selon l'équation (10) pour une profondeur donnée. La synthèse des résultats ainsi obtenus pour l'ensemble des puits examinés est présentée à la figure 14. Cette figure est confuse et difficile à lire mais a le mérite d'illustrer la variabilité intrinsèque de ce type de données. En pratique chaque puits a été examiné individuellement en regard des éventuels indices de gaz et d'eau ou des pertes de circulation qui sont rapportées.

Dans un second temps les indices et pics de gaz, les venues d'eau et les pertes de circulation recensés ont permis de filtrer ces données pour n'en retenir que les valeurs les mieux contraintes, celles qui reflètent le mieux la pression de fluide dans un puits et à une profondeur donnés (figure 15). Fait notable, les données disponibles pour le puits D020 se démarquent de celles des autres puits.



Figure 14 : Variation de la densité de la boue de forage en fonction de la profondeur pour chacun des puits étudiés.

DR : rapport quotidien (daily report), TS : rapport de quart (tour sheet).



Figure 15 : Variation du gradient de la pression de fluide en fonction de la profondeur et des assemblages stratigraphiques considérés.

Les assemblages considérés sont la Formation de Macasty et sa couverture d'une part, et les formations sous-jacentes de Mingan et Romaine d'autre part. Les valeurs obtenues pour le puits D020 se démarquent des autres.
L'analyse de ces résultats filtrés demeure ambigüe dans la mesure où la plupart des indices de gaz recensés ne constituent pas des surpressions sévères pouvant causer une éruption et qui doivent être contrôlées en augmentant le poids de la boue, mais plutôt une libération progressive du gaz piégé dans la matrice à mesure que le trépan désagrège celle-ci. Par ailleurs les données ne sont pas nécessairement cohérentes d'un puits à l'autre ni même long du profil d'un même puits. Dans certains cas en effet la section intermédiaire – entre la surface et la base de la Formation de Macasty – est forée à l'eau douce ou à l'eau salée sans ajout de gel et la pression de formation qui en est dérivée est une valeur minimale, non réaliste et généralement largement inférieure à la pression de formation estimée pour le puits D020 (foré avec un gel). Par ailleurs la section profonde – sous la base de la Formation de Macasty – peut être forée avec un gel (densité de la boue plus élevée que dans le cas de l'eau douce) auquel cas la pression de formation estimée est supérieure à celle estimée à partir des DST réalisés dans les mêmes formations. Cette même section peut aussi être forée à l'air en sous-équilibre, auquel cas il n'est pas possible d'estimer une pression de formation.

En dernière analyse il apparait donc que les pressions de fluide les plus réalistes pour la base de la Formation de Mingan et pour la Formation de Romaine sont celles estimées à partir des essais aux tiges. Pour le sommet de la Formation de Mingan et les unités sus-jacentes (la Formation de Macasty et sa couverture), les pressions de fluide les plus réalistes semblent être celles qui sont estimées à partir de la densité de la boue de forage dans le puits D020. Cette analyse est confortée par la présence d'un indice de gaz sévère rencontré à plus grande profondeur dans la Formation de Vauréal à 2111mKB dans le puits D007. Cette surpression a dû être contrôlée en augmentant la densité de la boue de forage dans une fourchette cohérente avec le gradient estimé à partir du puits D020 pour des profondeurs plus faibles (figure 15).

Ainsi deux valeurs moyennes sont retenues pour la pression de formation, soit 10,67 kPa/m pour le sommet de la Formation de Mingan et les unités sus-jacentes et 9,94 kPa/m pour les unités sous-jacentes. Ces valeurs moyennes ont été appliquées à l'ensemble des puits étudiés à l'échelle régionale. Dans le cas du puits D007 cependant, il est possible que le gradient de pression de fluides soit plus élevé que 10,67kPa/m pour les formations de Macasty et d'English Head inférieur, conséquence de la transformation du pétrole en gaz qui est plus avancée dans la région centre-sud de l'île à l'endroit où le puits D007 a été foré (voir la synthèse proposée dans Séjourné et Malo, 2014). Ceci constitue une limitation au modèle géomécanique régional qui est développé ici.

### 4.3 Contrainte principale horizontale minimale

Le gradient de la contrainte principale horizontale minimale (Shmin) a été estimé à partir de la relation entre le coefficient de Poisson (v), la pression lithostatique (Sv) et la pression de fluide (Pf) pour une profondeur verticale donnée selon l'équation (11) établie par Eaton (1969). Le choix de cette équation et la validité des paramètres sont discutés dans Séjourné (2015).

$$Sh_{min} = \frac{1}{PV} \left( \frac{v}{1-v} \times (Sv - Pf) + Pf \right)$$
(11)

Avec : Sh<sub>min</sub> exprimée en kPa/m

PV = Profondeur verticale (m)
v = Coefficient de Poisson (sans unité)
Sv = Pression lithostatique (kPa)
Pf = Pression de fluide (kPa)

Tel que mentionné à la section 2.1, la profondeur verticale (PV) est assimilée à la profondeur mesurée en première approximation dans cette étude. La pression lithostatique (Sv) est considérée ici comme équivalente à la contrainte principale verticale. Sv a été estimée à partir de la diagraphie de densité totale (RHOB) pour chacun des puits étudiés, en intégrant la somme des variations de la densité totale le long du profil du puits et en compensant les données dans la partie peu profonde du puits pour laquelle la densité totale n'est pas disponible. La diagraphie de densité totale (RHOB) n'est pas disponible. La diagraphie de densité totale (RHOB) n'est pas disponible pour les puits D005 et D010 de sorte que Sv et Shmin n'ont pas été estimées pour ces puits. Enfin le coefficient de Poisson (v) et la pression de fluide (Pf) ont été déterminés aux sections 4.1 et 4.2 précédentes. À titre d'exemple, la variation de Shmin et du gradient de Shmin en fonction de la profondeur sont illustrés pour un segment du puits D014 à la figure 16. Des résultats comparables sont obtenus pour les puits D012, D013, D015, D016 et D018. Seuls les résultats obtenus pour le puits D007 diffèrent des autres. Pour ce puits les valeurs de Shmin et du gradient de Shmin sont plus faibles pour la Formation d'English Head inférieur que pour les formations de Macasty et d'English Head supérieur (figure 17) contrairement aux autres puits. Les résultats pour tous les puits sont compilés au tableau 5 et présentés graphiquement en annexe.



Figure 16 : Détail de l'évolution de la contrainte principale horizontale minimale en fonction de la profondeur pour le puits D014 entre 700 et 970m.



Figure 17 : Détail de l'évolution de la contrainte horizontale minimale en fonction de la profondeur pour le puits D007 entre 2260 et 2540m.

Pour ce puits les valeurs de Shmin et du gradient de Shmin sont plus faibles pour la Formation d'English Head inférieur que pour les formations de Macasty et d'English Head supérieur contrairement aux autres puits (figure 16). Tableau 5a : Synthèse des valeurs estimées de la contrainte principale horizontale minimale (Sh\_min) et de son gradient pour les puits étudiés, pour les formations de Vauréal, d'English Head supérieur et d'English Head inférieur.

D020b : valeurs obtenues à partir des diagraphies brutes; D020s : valeurs obtenues à partir des diagraphies synthétiques (Tiré de Séjourné, 2015). Pour tous les autres puits, les valeurs sont estimées à partir de l'onde P brute et de l'onde S synthétique.

			Sh_mir	n (GPa)		Grad	ient de S	Sh_min	(kPa)
Unité	Puits	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum
	D007	5,2	22,9	10,1	45,6	10,7	17,4	1,0	22,1
	D010	4,4	11,1	2,8	18,5	10,7	17,1	1,3	20,8
	D012	4,0	14,3	6,1	27,7	13,7	17,5	0,8	25,2
Vauréal	D013	2,5	10,1	3,7	16,9	10,8	17,4	0,8	22,3
	D014	1,9	6,8	2,4	11,2	12,2	17,4	0,7	19,7
	D015	2,3	7,0	2,3	10,8	12,4	17,6	0,6	20,1
	D016	2,5	6,8	2,4	11,2	14,6	17,3	0,8	20,8
	D018	1,4	4,2	1,1	6,6	4,3	15,9	1,2	19,7
	D020b	0,4	7,9	3,1	13,9	2,3	17,7	1,1	23,7
d supérieur	D020s	2,0	7,8	3,1	13,1	13,6	17,5	0,8	18,2
	D007								
	D010								
	D012	23,9	26,4	0,8	30,0	16,5	18,2	0,5	20,4
	D013	15,1	18,4	1,0	20,8	15,7	17,6	0,5	18,9
	D014	10,2	11,7	0,7	13,4	14,8	16,8	0,5	18,6
Hea	D015	9,5	11,7	0,8	13,7	15,2	17,3	0,5	18,5
sh I	D016	9,6	11,5	0,7	13,1	14,2	16,9	0,5	18,2
nglisl	D018	5,8	6,6	0,3	7,3	14,4	15,8	0,5	17,0
ш	D020b	6,2	14,0	0,8	17,0	7,8	17,1	0,6	19,1
	D020s	12,9	14,3	0,7	15,5	16,8	17,3	0,1	17,6
	D007	34,8	38,3	1,5	44,0	14,5	16,3	0,6	19,0
Head inférieur	D010								
	D012	21,5	27,4	1,2	36,4	13,3	17,6	0,7	22,5
	D013	18,0	21,1	0,9	25,6	15,6	17,9	0,7	21,1
	D014	11,9	13,5	1,0	17,5	14,6	16,4	0,8	20,2
	D015	12,3	13,9	0,8	17,1	16,0	17,4	0,7	20,7
ish	D016	10,4	14,0	1,3	18,3	14,2	17,1	0,7	20,2
Ingl	D018	2,3	8,1	0,6	9,7	4,6	16,7	1,2	19,6
	D020b	0,8	15,9	1,1	20,4	0,9	16,7	1,0	21,0
	D020s	15,3	16,5	0,6	17,7	17,1	17,4	0,1	18,1

Tableau 5b : Synthèse des valeurs estimées de la contrainte principale horizontale minimale (Sh\_min) et de son gradient pour les puits étudiés, pour les formations de Macasty et de Mingan supérieur.

D020b : valeurs obtenues à partir des diagraphies brutes; D020s : valeurs obtenues à partir des diagraphies synthétiques (Tiré de Séjourné, 2015). Pour tous les autres puits, les valeurs sont estimées à partir de l'onde P brute et de l'onde S synthétique.

			Sh_mir	n (GPa)		Grad	lient de S	Sh_min	(kPa)
Unité	Puits	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum	Minimum	Médiane	Déviation	Maximum
	D007	28,1	41,1	2,4	46,8	11,5	16,7	1,1	19,2
	D010								
	D012	8,3	25,8	2,1	36,8	4,9	15,4	1,3	21,8
>	D013	8,6	18,8	2,7	28,6	6,9	15,1	2,2	23,0
ast	D014	10,0	13,7	1,0	18,6	10,9	15,3	1,1	20,6
Mac	D015	11,9	13,1	0,7	15,9	13,5	15,2	0,7	18,0
	D016	10,1	13,4	0,7	15,5	11,2	14,7	0,7	17,2
	D018	5,5	8,4	0,7	9,7	10,6	15,4	1,1	17,9
	D020b	11,2	15,8	0,7	19,5	10,9	15,6	0,7	18,8
	D020s	16,7	17,3	0,2	18,0	16,4	17,1	0,1	17,4
	D007	39,9	48,4	2,6	55,2	15,5	18,2	0,6	21,1
	D010	14,5	16,8	0,8	20,2	14,8	16,9	0,6	19,3
ingan supérieur	D012	20,1	30,8	2,4	41,1	10,5	16,8	1,2	21,9
	D013	11,6	23,5	1,9	30,5	8,6	17,1	1,2	21,9
	D014	10,5	16,2	1,6	21,0	9,7	16,2	1,5	20,2
	D015	13,1	17,6	1,9	21,2	13,3	17,0	0,9	18,7
	D016	10,7	17,2	2,1	21,2	10,5	16,4	1,1	18,0
Σ	D018	4,9	8,9	0,8	10,5	8,4	15,0	1,4	17,1
	D020b	17,1	19,0	0,5	20,9	16,5	17,5	0,3	20,1
	D020s	17,1	19,0	0,5	20,9	16,5	17,5	0,3	20,2

### 5. Interprétation des propriétés géomécaniques

Le coefficient de Poisson (v), le module de Young (E), l'indice acoustique de fragilité (BRIT) de même que la contrainte principale horizontale minimale (Shmin) et le gradient de celle-ci ont été estimés pour les puits D007, D012, D013, D014, D015, D016, D018 et D020 (tableaux 3 et 5). La présente section s'attache à examiner dans un premier temps l'évolution de ces propriétés mécaniques en fonction de la profondeur pour un puits donné, et dans un second temps la variabilité régionale de ces propriétés à l'échelle de l'Ile d'Anticosti.

### 5.1 Stratigraphie mécanique

#### 5.1.1 Modules élastiques

Le module de Young et le coefficient de Poisson peuvent être combinés graphiquement dans un diagramme binaire (figure 10) pour définir différents champs de fragilité ou de ductilité. Dans un tel diagramme le cadrant supérieur gauche correspond aux roches les plus fragiles, caractérisées par un coefficient de Poisson faible et un module de Young élevé. Le cadrant opposé correspond aux roches les plus ductiles. Lorsque ce diagramme est réalisé avec des données statiques il est possible de fixer une limite entre les champs fragile et ductile. Les données analysées ici étant exclusivement de nature dynamique une telle distinction serait purement arbitraire et l'analyse qui est proposée ici se veut donc essentiellement relative et qualitative.

À l'exception du cas du puits D007 qui sera discuté plus loin, tous les puits étudiés dans le cadre de la présente étude sont caractérisés par un coefficient de Poisson élevé pour la Formation de Macasty. À l'opposé la Formation de Mingan est caractérisée par le coefficient de Poisson le plus faible, tandis que les roches qui forment la couverture de la Formation de Macasty – formations d'English Head et de Vauréal – présentent un coefficient intermédiaire qui ne permet pas de distinguer entre les différentes unités de la couverture. Le module de Young apparaît comme le paramètre déterminant pour distinguer les unités de la couverture les unes des autres, avec des valeurs croissantes depuis la Formation d'English Head inférieur jusqu'à la Formation de Vauréal, la Formation d'English Head supérieur présentant des valeurs intermédiaires entre ces deux unités. Les figures 10, 18a et 18b illustrent ces relations pour le puits D014 à titre d'exemple. Des relations similaires sont observées pour le puits D020 (Séjourné, 2015).

L'indice acoustique de fragilité est une représentation mathématique simple qui permet de combiner le module de Young et le coefficient de Poisson en une valeur unique normalisée de 0 à 100, les valeurs les plus élevées correspondant aux roches les plus fragiles (Séjourné, 2015). Une représentation graphique de cet indice sous la forme d'une diagraphie synthétique permet d'illustrer l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur (figures 18a et 18b), ce dont le diagramme binaire de la figure 10 ne rend compte qu'imparfaitement. Ainsi dans le cas des puits étudiés ici, et à l'exception du puits D007, on observe un fort contraste de fragilité au contact entre les formations de Mingan et de Macasty (figure 18b), la seconde étant significativement plus ductile que la première. Le contact entre les formations de Macasty et d'English Head inférieur est souligné par un second contraste de fragilité, la Formation de Macasty étant significativement plus fragile que la Formation d'English Head inférieur susjacente, à l'exception notable de niveaux calcareux plus fragiles localement présents au sein de cette dernière. Bien qu'une certaine variabilité soit observée dans les valeurs absolues de l'indice acoustique de fragilité d'un puits à l'autre, cet indice augmente progressivement de la base de la Formation d'English Head inférieur jusqu'au sommet de la Formation de Vauréal pour chacun des puits étudiés (figures 18a et 18b). Dans l'ensemble la Formation de Macasty est donc surmontée d'abord par des roches plus ductiles mais parfois interlitées de niveaux calcaires fragiles d'épaisseur métrique dans la Formation d'English Head inférieur, puis par des unités de plus en plus fragiles jusqu'en surface. Cette évolution est cohérente avec celle observée pour le puits D020 dans Séjourné (2015).



Figure 18a : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur pour la Formation de Vauréal pour le puits D014.



Figure 18b : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur pour les formations d'English Head, de Macasty et de Mingan pour le puits D014.

Le cas du puits D007 enfin, est atypique si on le compare aux autres puits étudiés ici. S'il est possible de reconnaitre dans ce puits un contraste entre les propriétés mécaniques de la Formation de Macasty et celles des formations sus- et sous-jacentes, l'évolution relative de ces propriétés en fonction de la stratigraphie n'est pas la même que précédemment et se caractérise principalement par une plus grande fragilité de la Formation d'English Head inférieur comparativement à la Formation de Macasty (figure 13). De fait c'est le toit de la Formation d'English Head inférieur qui offre le meilleur contraste mécanique avec la couverture.

### 5.1.2 Contrainte principale horizontale minimale

Dans le contexte de la fracturation hydraulique, l'intensité de la contrainte principale horizontale minimale (Shmin) contrôle la facilité avec laquelle les fractures vont croître et se propager, dans la mesure où la pression exercée par le fluide de fracturation doit au minimum équilibrer, et si possible excéder, la pression exercée en sens contraire par Shmin pour que les épontes d'une fracture puissent s'écarter l'une de l'autre. Dans le cas des formations étudiées ici on relève une grande régularité dans le gradient de Shmin et donc dans l'augmentation de la valeur absolue Shmin avec l'accroissement de la profondeur (figures 18a et 18b). Cette régularité est interrompue dans la Formation de Macasty qui est au contraire caractérisée par une diminution du gradient de Shmin. On peut ainsi mettre en évidence un contraste mécanique marqué entre la Formation de Macasty et les unités sus- et sous-jacentes (figure 18b). Des valeurs absolues de Shmin plus faibles au sein de la Formation de Macasty se traduisent dans la capacité d'imposer une pression d'injection plus faible pour ouvrir des fractures hydrauliques dans la Formation de Macasty que dans les unités immédiatement sus- et sous-jacentes. En d'autres termes, la Formation de Macasty paraît être isolée mécaniquement par des barrières de fracturation qui inhibent la propagation des fractures hydrauliques en dehors de la Formation de Macasty. Dans la couverture, l'unité immédiatement sus-jacente à la Formation de Macasty soit la Formation d'English Head inférieur est en outre caractérisée par la présence de niveaux calcareux qui présentent des valeurs de Shmin beaucoup plus élevées (figure 18b), augmentant ainsi la propension de cette unité à agir comme une barrière à la propagation des fractures hydrauliques vers le haut.

Cette interprétation est valide pour la totalité des puits examinés ici à l'exception du puits D007, et elle est également cohérente avec les résultats et les interprétations présentés pour le puits D020 à partir d'un jeu de données complet qui inclut l'enregistrement d'une diagraphie acoustique de l'onde S (Séjourné, 2015). De même que pour les modules élastiques, l'évolution verticale de Shmin et du gradient de Shmin dans le puits D007 se démarque de celle des autres puits étudiés et c'est la Formation d'English Head inférieur, non pas la Formation de Macasty, qui présente les valeurs de Shmin les plus basses et le contraste mécanique le plus marqué (figure 13). L'originalité des résultats obtenus pour le puits D007 est discutée à la section 5.2.2.

### 5.2 Variations régionales

### 5.2.1 Transects régionaux

Ainsi qu'il a été souligné précédemment, les propriétés géomécaniques déterminées dans cette étude sont dans l'ensemble cohérentes pour chacune des formations considérées et les contrastes mécaniques reconnus pour un puits donné sont également observés de manière persistante pour les autres puits

bien que le puits D007 fasse exception. Il a été mentionné également qu'en dépit de cette cohérence dans les résultats une certaine variabilité était observée d'un puits à l'autre. La présente section s'attache maintenant à interpréter la signification régionale de ces observations en présentant et en discutant une série de transects réalisés à travers l'île (figure 19). Dans chacun des transects examinés seuls l'indice acoustique de fragilité et le gradient de Shmin sont représentés. L'indice acoustique reflète l'évolution des modules élastiques combinés (coefficient de Poisson et module de Young). Le gradient de Shmin reflète l'évolution de Shmin en s'affranchissant de l'effet de la profondeur ce qui permet de comparer une même unité d'un puits à l'autre même si celle-ci est rencontrée à des profondeurs différentes.



Figure 19 : Carte de localisation des transects examinés.

Fond cartographique : Thériault (2002) et SIGPEG (2015). Le tracé de la Faille de Jupiter est tiré de Bédard et al. (2014).

Un premier transect relie du nord au sud les puits D018, D012 et D007 (figure 20). Outre l'augmentation évidente de l'épaisseur de la Formation de Macasty vers le sud, ce transect permet d'évaluer la variation des propriétés mécaniques de cette formation et de sa couverture en fonction de l'approfondissement du bassin. L'examen de la figure 20 confirme ainsi que le sommet et la base de la Formation de Macasty sont soulignés par des contrastes mécaniques marqués du nord au sud de l'île, en particulier par un gradient de Shmin contrasté entre la Formation de Macasty et les unités immédiatement sus- et sous-jacentes. Dans le détail toutefois, ce contraste est net pour l'ensemble de la formation dans le centre de l'île (puits D012) mais plus variable au sein même de la formation dans les régions nord et sud. Au nord (puits D018) la Formation de Macasty mais une barrière équivalente paraît manquer entre cette dernière et la formation sous-jacente de Mingan. Au sud (puits D007) c'est essentiellement la Formation d'English Head inférieur barrière à la propagation des fractures. Enfin au nord et au centre de l'île des niveaux calcareux développés dans la Formation d'English Head inférieur

D012 H\_MIN\_GRAD BRI D007 D018 H MIN GRAD [KP MIN\_GRAD [KP EEs ÉEs EEi EEi My My Mn Mn

renforcent l'intégrité de la couverture au-dessus de la Formation de Macasty. Ces niveaux ne sont pas reconnus au sud dans le puits D007.

Figure 20 : Variation des propriétés mécaniques le long du transect nord-sud.

La profondeur est nivelée au toit de la Formation de Macasty. Le transect est localisé à la figure 19. EEs : Formation d'English Head supérieur; EEi : Formation d'English Head inférieur; My : Formation de Macasty; Mn : Formation de Mingan.

Un second transect relie d'ouest en est les puits D020, D014, D015 et D016 (figure 21). Ce transect permet d'évaluer la variabilité éventuelle des propriétés mécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture le long d'une coupe longitudinale dans un secteur géologiquement homogène où les épaisseurs et les environnements de déposition varient peu d'un puits à l'autre. L'examen de la figure 21 révèle l'homogénéité des propriétés mécaniques pour une formation donnée d'un puits à l'autre et surtout la persistance des contrastes mécaniques de part et d'autre de la Formation de Macasty dans

cette région. Tout au plus peut-on relever une diminution de l'épaisseur de cette formation d'ouest en est, phénomène cohérent avec ce qui est observé à l'échelle régionale puisque la Formation de Macasty s'amincit vers l'est jusqu'à être absente dans le puits D010 (tableau 1).



D016

Figure 21 : Variation des propriétés mécaniques le long du transect ouest-est. La profondeur est nivelée au toit de la Formation de Macasty. Le transect est localisé à la figure 19. EEs : Formation d'English Head supérieur; EEi : Formation d'English Head inférieur; My : Formation de Macasty; Mn : Formation de Mingan.

Un troisième et dernier transect relie sur une courte distance les puits D012 et D013 (figure 22). Ce transect permet d'évaluer la variation des propriétés mécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture de part et d'autre de la Faille de Jupiter. Cette faille représente une discontinuité majeure dans l'architecture structurale de l'île et sépare deux domaines qui se distinguent par des profondeurs d'enfouissement et des épaisseurs contrastées (Bordet et al., 2010; Bédard et al., 2014). Le puits D013 est implanté à proximité immédiate de la Faille de Jupiter, dans le toit de celle-ci. Le puits D012 est implanté plus au sud-est dans le mur de la faille et présente une augmentation de l'épaisseur de la Formation de Macasty qui est caractéristique du bloc abaissé au sud de la faille. L'examen de la figure 22 révèle que la Formation de Macasty et sa couverture présentent les mêmes propriétés mécaniques de part et d'autre de la faille. La proximité de la faille, dans le cas du puits D013, ne paraît pas affecter aucunement les propriétés mécaniques des formations examinées. Les distances réelles qui séparent ces puits de la Faille de Jupiter demeurent cependant imprécises en l'absence d'interprétations sismiques

publiées sur lesquels se reposer. Les distances suggérées à la figure 22 reposent sur l'interprétation de la trace de la Faille de Jupiter au toit du socle telle qu'elle est proposée par Bédard et al. (2014). La projection arbitraire de ce tracé vers le haut – vers la Formation de Macasty et sa couverture – diminue d'autant la précision de l'estimation qui peut être faite des distances qui séparent les puits D012 et D013 du plan de faille.



Figure 22 : Variation des propriétés mécaniques de part et d'autre de la Faille de Jupiter.

La profondeur est nivelée au toit de la Formation de Macasty. Le transect est localisé à la figure 19. EEs : Formation d'English Head supérieur; EEi : Formation d'English Head inférieur; My : Formation de Macasty; Mn : Formation de Mingan. Les distances qui séparent les puits D012 et D013 de la Faille de Jupiter sont proposées à titre indicatif.

### 5.2.2 Limites de la portée régionale de l'étude

Deux constats principaux émergent de l'examen des transects présentés ci-dessus. Le premier constat est que les propriétés mécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture varient peu d'un puits à l'autre à l'échelle régionale à l'exception du puits D007 qui sera discuté plus loin, et ne semblent pas affectées par la proximité avec la Faille de Jupiter. L'étendue régionale de ces transects ne couvre toutefois pas les extrémités occidentale et orientale de l'île car les données manquent pour établir les propriétés mécaniques des puits disponibles dans ces deux régions (respectivement les puits D005 et D010, figure 19). Le second constat est que les principales variations observées dans les propriétés mécaniques sont associées à un unique puits (D007). Des considérations géologiques peuvent expliquer ce phénomène, en particulier un environnement de déposition différent et donc une lithologie et une distribution de la matière organique différents de celles rencontrées dans le reste du bassin.

Une explication alternative pourrait être que les relations de calibration développées dans le cadre de cette étude, qui reposent sur les données du puits D020, peuvent ne pas être applicables au puits D007. Les formations d'English Head et de Macasty présentent en effet un degré de maturité thermique de la matière organique plus élevé dans ce puits que dans les autres puits étudiés. Selon Séjourné et Malo (2014), le degré de maturité de la matière organique analysée dans la Formation de Macasty dans la région centre-sud où est implanté le puits D007 pourrait être dans la zone à condensats ou dans la zone à gaz sec, et dans tous les cas le degré de maturité est plus élevé que pour les autres puits étudiés ici. Un degré élevé de maturité thermique se traduit par l'expulsion partielle du pétrole, par sa conversion en gaz naturel, par la dégradation du kérogène et par l'augmentation de la pression de fluide. Ce processus affecte certaines diagraphies à des degrés divers, notamment le rayonnement gamma, la résistivité et la diagraphie acoustique de l'onde P de sorte que les résultats obtenus pour le puits D007 doivent être considérés avec discernement : l'examen de ce puits met en évidence l'une des limitations de la méthode développée ici, dont l'application devrait être restreinte à des régions géologiques ou à des unités stratigraphiques pour lesquelles le degré de maturité thermique de la matière organique est comparable à moins que des données indépendantes ne permettent de valider la méthode dans d'autres environnements. Ultimement, des diagraphies complètes comprenant l'onde S pour des puits forés dans ce domaine thermiquement plus mature permettraient de calibrer de façon rigoureuse les propriétés géomécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture dans cette région.

Enfin il convient de souligner ici que si les résultats de la présente étude permettent de caractériser l'intégrité de la couverture de la Formation de Macasty et indiquent que cette intégrité est préservée même à quelques centaines de mètres d'une faille régionale, cette étude ne renseigne pas sur la possible connectivité qui pourrait exister entre la Formation de Macasty et la surface dans le cas où un réseau étendu de fractures naturelles perméables serait présent. En surface les études structurales mettent en évidence l'existence de plusieurs familles de fractures (Bordet et al., 2010; Pinet et al., 2015). En particulier, une famille de fractures sub-verticales orientées N100° semble recouper totalement les différentes unités mécaniques identifiées à l'affleurement. Pinet et al. (2015) soulignent que l'extension de ces fractures en sous-surface et l'évolution de leurs propriétés hydrauliques et mécaniques avec la profondeur demeurent incertaines en l'état actuel des connaissances. Ces auteurs relèvent également que si ces fractures sont généralement régulièrement espacées elles peuvent aussi se manifester à

l'occasion sous la forme de réseaux denses très localisés. Dans la perspective de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels sur l'Ile d'Anticosti il apparaît particulièrement souhaitable d'examiner les relations qui peuvent exister entre 1) ces réseaux de fractures naturelles documentés en surface, 2) la distribution et les caractéristiques des principales familles de failles interprétées en sismique, 3) l'orientation de la contrainte principale horizontale maximale actuelle et 4) la nature et la signification de la remontée de saumures et d'hydrocarbures documentée récemment à proximité de la Faille de Jupiter (Daoust et al., 2014; Clark et al., 2015).

### 6. Conclusions et recommandations

Cette étude a permis de préciser les propriétés géomécaniques de la Formation de Macasty et de sa couverture à l'échelle régionale de l'Ile d'Anticosti, à partir des données diagraphiques des forages pétroliers et gaziers disponibles sur l'île et par calibration avec les données d'un puits de référence, le puits Pétrolia/Corridor, Anticosti, Chaloupe No. 1 (D020).

À l'échelle du puits les résultats mettent en évidence la présence de contrastes mécaniques nets entre la Formation de Macasty et les formations sus- et sous-jacentes. Dans un contexte de fracturation hydraulique ces contrastes mécaniques se traduisent par l'existence de barrières à la propagation des fractures hydrauliques hors de la Formation de Macasty. Par ailleurs l'analyse de deux puits situés de part et d'autre d'une faille régionale, la Faille de Jupiter, révèle que la proximité de la faille n'affecte pas significativement les propriétés mécaniques de la couverture.

À l'échelle régionale les résultats obtenus font preuve d'une remarquable homogénéité d'un puits à l'autre, sauf dans la partie centre-sud de l'île où une barrière à la fracturation est identifiée plus haut dans la couverture plutôt qu'immédiatement au-dessus de la Formation de Macasty. Dans ce cas précis le phénomène peut-être réel ou correspondre à un artefact lié aux limitations méthodologiques de l'étude, sans qu'il soit possible de trancher sur la base des données actuellement disponibles.

Les calibrations nécessaires à cette étude reposent sur la diagraphie acoustique brute de l'onde S du seul puits D020 : le corpus de données disponibles ne permet donc pas de réaliser des tests en aveugle avec d'autres puits distribués à travers l'île pour confirmer indépendamment la validité des calibrations et la validité de la méthode a dû être confirmée indirectement à partir du lien reconnu entre les diagraphies des ondes P et S pour le seul puits D020. Dans le futur il est donc recommandé de confirmer la robustesse de la méthode et des résultats présentés ici en les comparant aux données qui pourront être éventuellement collectées dans de nouveaux forages. Cette confirmation pourrait prendre deux formes indépendantes : 1) Confirmer à l'échelle régionale le lien reconnu ici entre les diagraphies des ondes P et S pour le puits D020 en examinant systématiquement la relation entre les ondes P et S pour chacun des nouveaux forages. 2) Établir indépendamment les propriétés géomécaniques pour chacun de ces nouveaux forages et les comparer aux résultats obtenus ici. Dans la perspective de l'exploration et de l'exploitation des réservoirs non conventionnels sur l'Ile d'Anticosti il apparaît aussi particulièrement souhaitable d'examiner l'incidence que peuvent avoir les discontinuités structurales – failles interprétées en sismique et réseaux de fractures naturelles documentés en surface – sur l'intégrité de la couverture de la Formation de Macasty.

## Remerciements

L'auteur remercie Denis Lavoie (CGC-Q) pour la lecture critique de cette contribution, ainsi que la Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec pour avoir facilité l'accès aux données publiques nécessaires à ce travail.

Ce projet a été réalisé avec le support financier de Ressources Naturelles Canada au travers de contributions financières du Secteur des Sciences de la Terre et celui de l'Énergie dans le cadre de son programme de recherche et de développement énergétique (PRDE) de ce dernier.

# Références

Bédard, K., Comeau, F.-A., Malo, M., 2014. Lithostratigraphie standardisée et modélisation géologique 3D du bassin d'Anticosti. Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport de recherche R-1561, 83p.

Bordet, E., Malo, M., Kirkwood, D., 2010. A structural study of western Anticosti Island, St. Lawrence platform, Québec : a fracture analysis that integrates surface and subsurface structural data. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v.58, p.35-55.

Clark, I., Daoust, P., Desrochers, A., Greenman, W., Fortin, D., 2015. Paleozoic brine and gas seeps on Anticosti Island : Impacts for developing unconventional hydrocarbon resources. Dans Congrès conjoint AGU-GAC-MAC-CGU, Montréal, mai 2015.

Daoust, P., Desrochers, A., et Clark, I., 2014. Origine d'un monticule carbonaté alimenté par une source d'eau hypersaline riche en méthane thermogénique dans l'île d'Anticosti : impacts sur l'exploration pétrolière. 82ième congrès de l'ACFAS, Program et résumés, Montréal 2014.

Eaton, B.A., 1969. Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations. Journal of Petroleum Technology, v. 246, p.1353-1360.

Pinet, N., Brake, V., Lavoie, D., 2015. Geometry and regional significance of joint sets in the Ordovician-Silurian Anticosti Basin: new insights from fracture mapping. Geological survey of Canada, Open File 7752, 25 pages.

Séjourné, S., 2015. Étude géomécanique de la Formation de Macasty et de sa couverture dans un puits pétrolier et gazier (Pétrolia/Corridor Chaloupe No. 1), Île d'Anticosti, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier Public 7892, 51p.

Séjourné, S., Malo, M., 2015. Géologie et potentiel en hydrocarbures des bassins sédimentaires du sud du Québec. Institut national de la recherche scientifique, Québec, Rapport de recherche R-1552, 147p.

SIGPEG, 2015. Système d'Information Géoscientifique Pétrolier et Gazier. Direction du bureau des hydrocarbures, Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles. Voir site internet http://sigpeg.mrn.gouv.qc.ca

Thériault, R., 2002. Carte géologique du Québec - Édition 2002. Ministère de l'Environnement et des Ressources du Québec, DV 2002-06, 8 pages.

## Annexe 1 :

Diagraphies de calibration des ondes P et S à partir des diagraphies non acoustiques

- Puits D005, D007, D010, D012, D013, D014, D015, D016, D018 et D020 -





PETRA 6/6/2015 6:12:13 PM

) D012



	VAUREAL_INFE
and the second of the second o	March Martin and a start way and a start of the start of
and and the second second second of the seco	ward war an an formany many here and an an an and an an an and a super grader that the second construction and an and an and an a second and a second a second and a second
and the second	And have a second and the second and the second and the second second second second second second second second
(a) = 0	$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i$
markhumen was the fight Marker of Same and a second of the	Norman Nich of Mary and many of the second
mmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmm	MMM
	addited by the second strain the first of the second strain was second by the second
1950 1025 1000 975 950 955 800 875 850 825 800 775 775 725 700 675 650 655 650	
and a second and a second and the second of the	and a second and the second and a



PETRA 6/6/2015 6:13:50 PM





and and the second the second second second and the second s		and a second the free of the property of the p	mmmmmmmmmmm	and and a second and the for the second of	وووارد والمحارب والمحاولة والمحاربة والمحاور والمحارب والمحارك والمحارك والمحارب والمحارب والمحارك والمحارك والمحاومة والمحاولة	and an and an and a share and a share a share and a share and a share and a share and and a share a	have nother here in here had been so here for the hold had been and an and an and and and and and and	and have been and the state of	
A share we have a share we want the share we w	125 1100 1075 1050 1025 1000 975 950 925 900 875 850	A Constraint of the second secon	Maria Maria	Manual Min Wer My Mary W. M. Marine and an and the server of the server	$\langle \mathcal{F}_{n}, $	Anna was the second was a second manuful and the second second second second second second second second second	And and the second s	And the second of the second o	ENGLISH_HEAD
And have been a superson of the second			MWW warman w	WWW IN INTERPRETATION IN THE REAL PROPERTY INTO THE REAL PROPERTY INTO THE REAL PROPERTY IN THE REAL PROPERTY INTO THE	MAN Multimers remained with present way prove way and a second and a second second second second second second	ANN WITH A CONTRACT OF A CO	and the second	And a second	MACASTY MINGAN_SUPEI
Although a substance of the second seco	1550 1525 1500 1475 1450 1425 1400 1375 1350		Munhuman marked and my	and the second	And have been and the second and the second s	at	And the second s	ALT - ALT ALT AND	MINGAN_INFER
			TWWW. W.	Church Harley A. Contraction A. Cont	I have been and the second	United to the second second with the second secon		UNIONAL PARAMANANANANANANANANANANANANANANANANANAN	
HIT HAVE AND	2000 1975 1950 1925 1900 1875 1850 1825 800	A STATE AND A S	and while have and while while while the second of the sec	WHOMMAN WAY AND A CARD AND AND AND AND AND AND AND AND AND AN	in the second				ROMAINE
WMW HANNA	2175 2150 2125 2100 2075 2050 2025		Mr. W. W. W. K. Marrison Mr.	Month and Market and A	and the second s		String and the string the string to the stri	And the second se	SOCLE_PRECA





○ D014

						DTP_GR_ALL [US/M] 300 150		TP_NPOR_ALL [US/N 300 150	ŋ
HCAL_D014 [MM] 150 200 GR [GAPI]	DTS_RHOB [US/M]	DTP_RHOB [US/M] 300 150 DTCO [US/M]	DTS_ILD2 [US/M]	DTP_ILD2 [US/M] 300 150 DTCO [US/M] D	DTS_GR_ALL [US/M] 600 300 TS_GR_UPPER [US/I	TP_GR_UPPER [US/I 300 150 1]DTCO [US/M]_DT	IJS_NPOR_ALL [U <b>S</b> /I 600 300 S_NPOR_UPPER [US	P]_NPOR_UPPER [US 300 150 M]_DT [US/M]	ſΜ]
0 150	600 300	0 300 150	600 300	300 150	600 300	300 150	600 300	300 150	BECSIE_E_B_V
	25								
	75								
	- 0- 								
	125	<b>)</b>		1		) j		}	
	150				, ž		, k		
	175				an the second		throw have		
44444	- 200 	Wyy 44	NMM	NVMM	NUMA	Anna	NUM	MANN	
John All			The		arrive a	The	**	Mar I	
			MANA		- ALAN ALAN	ANNA ANA	- All	When we	
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A			A MARINA		and a strain of the			A A PERSON	
			the Ample		ina Vyn <sup>h</sup>		t t		
Alper Ma	325	- Annala	ANY WAY	Show where	all handles	- The second		- the second	
	320		AND		and the second				
	375		June 1	Jamma	yne Wytra	J.MMA		1	
the second secon		Adda a	ANN MA	Market Market	And a	And the second	Alex, Mark	AN MAR	
the second s	425 · · · ·		mercen		Jon Hansel				
1 mm			- True		Wand	- WWW	Number 1	N-MM	
WWW WWW					WWW	- Mulm	- Munit	MM.	
Man Mar			A		Annala				
MAN					AMANA	MMM		MW.	VAUREAL_INFE
			-	When	Solution of the second			White	
a ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~		- And	MALA	AND AND	by where	hertofust	-	An Ala	
MANNA A		-	MMM	MMM	Martan	hyberty	In provide	WWW	
MM M		Whythe	A.M.	N.	M	M.	have	MWW	
and here a			all and	Area Ar	1. 	MIL AND	1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.	A ANA	
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A			Muhare		* Mayher	- Aller		all like a	
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		-	MM	ANN ANN	al Maria	ANNA A		AN AN	
			-	WW	Antonia	ANN HA		A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	
			Sun Article		the state of the s		Mar A Ara	ALL ALL	
- And			h water	AL-	Jann grange	and the second	table to and		ENGLISH HEAT
			fulled	Mucch	mhailt			NUC	
annual and			Juny		where we have				
	852		الملامه		and and a second				
			J		in the second				
	875	2	<u> </u>						MACASTY
			M						MINGAN SUPE
	925	Million Party	when the		LAND AND AND AND AND AND AND AND AND AND				
	516	A MAN	- ANN			<b>N</b>	The second secon		
			×						
	1025		MM		The second secon	-			
And States			WINNY	And the second s	- Anna -	A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	and the second se		
	1075		3	3					
	11/25				No beneral		And the second se		
	1150 1150								MINGAN_INFEF
ج ج									
		Mar North Contraction		M		Annual			
See .	1225		- Van	- Vite and	)				
	1250								
Hann			•	1	<b>1</b>	,		<u> </u>	
The second se	1275				the second s	N. N.	33		
Apple war					My Hunnert	My June 199	AN ANY ANY ANY ANY ANY ANY ANY ANY ANY A	- Andrew	
the work of the second	1325 1300 1275			<del>د</del> ا	WAY HAVA HAVANA	WAY WAY WANT	and the second	address and the second	
ANNOW AND			3	Multi-	We want of the Angle	Werner Werner HANNAR Manuer	- China - China - China	Land and the second of the sec	



) D015



) D016

HCAL_D016 [MM] 100 250		DTP_RHOB [US/M] 300 150		DTP_ILD2 [US/M] 300 150	DTS_GR_ALL [US/M] 600 300	DTP_GR_ALL [US/M] 300 150 TP_GR_UPPER [US/II 300 150	נ ד <u>S_NPOR_ALL [U</u> נד 600 <u>3</u> 00	TP_NPOR_ALL [US/N           300         150           }_NPOR_UPPER [US         300           300         150	] [M]
GR [GAPI] 0 150	DTS_RHOB [US/M] 600 300	DTCO [US/M] 0 300 150	DTS_ILD2 [US/M] 600 300	DTCO [US/M]D 300 150	TS_GR_UPPER [US/I 600 300	1] <u>DTCO [US/M]</u> DT 300 150	S_NPOR_UPPER [US 600 300	M] DT [US/M] 300 150	BECSIE_E_B_V
والعربه ومعطالها معدا ممرسهم إستريمه ومدينا سيله	125 100 75 50				der men ser	all second s	ether production of the second se	rthey and with the grant provide recommendation of the second second second second second second second second	
AND THE AND	225 200 175 750	And the second second second	M Harris Harris Manager	White And	rando and frankingen and an an an	and the state of t	And the second standard and the second second	All and a state of the second s	
MATCHANNAN AND AND AND AND AND AND AND AND AN	HUNNAN MUNANANANAN	And the second in the second s	And a substant of the substant of the	high strates of the second of the second	۲۰۰۹ ۲۰۰۹ کاره میراد برد. را کاره کاره ایدا می در میرود میکارد. ۲۰۰۷ کاره میراد برد. در با کاره کاره ایدا می در میرود میگار	And some of the Angle of the state of the st	and second second second second second	Lefterstein frichtigt die staffen franker	
And the second second shares	400 375 350 345	ANN WARNAGE AND ANN ANN ANN ANN ANN ANN ANN ANN ANN	ANNA SAN TANA MANA	ANNAN ANA MANANANA	all services and recorded the services of the	MAN HANNA MANA MANA	Anther second operations and	Anton on the formation of the	
212-2-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1	00 2475 2450 2425 2	Annal Manager and Annal Anna	Marth Jones And	welling the many of the second s	ינייטואן גאירייע און אינון גיען איייאייערייע איי	www.handalana.an	wanter water the second	weight the floor of the second s	VAUREAL_INFE
An apart of hereformation		ALL AND THE ALL AND ALL	My water of the state of the st	Andrewing pression and the	Mademan and the second standing of the second s	Mahammanyllowahahammanyl	shipping and have been a source of the	Man and Manual Anna And	
	My	Average and the second and the secon	manual will be the provider the	Ary reprised where the states of the second	ע, זיגל אונא העריים אילי איייל אייל איייע אוזי איייל אייל איייע איזי אייי יישריי איי	Artstrated belock the Alexan	*************************************	And 1999 And 1994 And 1994 And 1994 And 1994	ENGLISH_HEAI
tar where the second	725		Jacobson Andrews	have been brief and	יריאקיריראיינעראין אייעראין אייעראין אייעראין אייעראין אייעראין אייעראייעראייעראייעראייעראיין אייעראייעראייער	Parriage and probably	مارور والمارين الماريني الماري محمد الماريني المارين	V <mark>erpolonistications</mark>	ENGLISH_HEAI
			Mar Hard Land				minterfections	And the local	
	8456		U.J. Joseph J.		والمرام والمرادية	Alleh Arthur	Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-Al-A		
All Martin All All All All All All All All All Al			mahulpik. Lamady (m	And the second s	and workshipping				MACASTY
Market Market Market	5 350 325		all grow when we are	w have a second se	And the second sec				MINGAN_SUPE
		A MAN	A Contraction of the second se		and the second second			MALLAN MARK	
Man Marana Marana		Alphaner Charles			My Mary marker ru	ALCONCENT N	All and a second se	Accession of the	
Million	11255 1100 1	MAN MAN	M	M Martine	ANN AMARIAN			W	
	1200 1175 1150			Martin Martin	and the second second		and the second	The second s	
	1350 1225		Murana	All Marine Marine			<u>\$</u>		MINGAN_INFEF
A CARLON CONTRACTOR	1300 1275	- And	Mun M Mun C						ROMAINE
							. 🛨		



D018 <u>HCAL_D018 [MM]</u> 200 300 <u>GR [GAPI]</u> 0 150 <u>DTS_RHOB [US/M]</u> 600 300 <u>GR [GAPI]</u> 600 300	DTP_RHOB [US/M] 300 150 DTCO [US/M] 300 150 600 30	DTP_ILD2 [US/M] 300 150 00 300 150 DTCO [US/M] DTS_GR_UPPER [ 00 300 150 00 00	DTP_GR_ALL [US/M] 300 150 S/M] TP_GR_UPPER [US/II]S_NP(0 300 300 150 600 US/N] DTCO [US/M] DT S_NPOF 300 300 150 600	LTP_NPOR_ALL [US/M 300 150 DR_ALL [U <b>S/M</b> ]_NPOR_UPPER [US 300 300 150 R_UPPER [US <sup>M</sup> ] DT [US/M] 300 300 150	M] BECSIE_E
					VAUREAL_ ENGLISH_I ENGLISH_I MACASTY MINGAN_S

HS=1

PETRA 6/6/2015 6:21:11 PM

⊢\_\_\_

○ D020



## Annexe 2 :

Diagrammes binaires de calibration des ondes P et S à partir des diagraphies non acoustiques

- Puits D005, D007, D010, D012, D013, D014, D015, D016 et D018 -

WELL: D005 (6819 samples)



PETRA 3/5/2015 12:21:59 PM

WELL: D005 (6825 samples)



PETRA 3/5/2015 12:22:29 PM

WELL: D007 (13521 samples)



WELL: D007 (13521 samples)



PETRA 6/6/2015 6:29:40 PM

WELL: D010 (4291 samples)



WELL: D010 (4291 samples)



PETRA 3/5/2015 2:57:51 PM
WELL: D012 (16183 samples)



PETRA 2/25/2015 9:58:26 PM

WELL: D012 (16206 samples)



PETRA 2/25/2015 10:01:16 PM

WELL: D013 (12625 samples)



PETRA 2/25/2015 9:58:45 PM

WELL: D013 (12741 samples)



PETRA 2/25/2015 10:01:30 PM

WELL: D014 (7762 samples)



PETRA 2/25/2015 9:58:59 PM

WELL: D014 (7773 samples)



PETRA 2/25/2015 10:01:43 PM

WELL: D015 (7939 samples)



PETRA 2/25/2015 9:59:14 PM

WELL: D015 (7946 samples)



PETRA 2/25/2015 10:01:57 PM

WELL: D016 (8038 samples)



PETRA 2/25/2015 9:59:26 PM

WELL: D016 (8047 samples)



PETRA 2/25/2015 10:02:16 PM

WELL: D018 (2945 samples)



PETRA 2/25/2015 9:59:45 PM

WELL: D018 (2983 samples)



PETRA 2/25/2015 10:02:33 PM

## Annexe 3 :

**Diagraphies brutes et synthétiques** 

- Puits D005, D007, D010, D012, D013, D014, D015, D016, D018 et D020 -



5 650 625 6	Married Married Married			New March and and	m 12 m Mr. Marine		VAUREAL_INFE
860 825 800 775 750 725 700 61	manage and the second			Sand and the second	All have been bread brown b		MACASTY
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	()hhard ()	Man		Mumme	Mon	2	MINGAN SUPEI
$\left. \begin{array}{c} & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & $	and March Milling and Some and a sub-	man have a second and the second and	Mund war	and the second	and of the Mr. and a second a second and a second and the for the and the formation of the formation of the second and	when when when	MINGAN_INFER
1200 1175 1150 112	Museum Andrew second second		M				
HS=1							
PETRA 6/6/2015 6:35:02 PM							



	650				hand	human		MEDDIMACK
		5	25			-	5	MERRIMACK
	949	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			North Contraction			BECSIE_E_B_V
کے کج	8	3	_ } <b>1</b>		You		<b>4</b>	
k y		<u> </u>			- Mark	-	Ę	
<b>* *</b>	725	ξ		and the second se	When the	W-W	2	
₹	Ē	5		Maren A			$\rightarrow$	
2	750	ξ	<u> </u>	- Andrew - A	-share		3	
5	ي ب	<u>}</u>		Same and a second s	- Alexandre		-	
	- <sup>2</sup> -	ξ			- Andrew -	a land	T <sub>x</sub>	
\$ }		Ś		Needlinet	hank	5.4	5	
		ξ	₹ }	<u> </u>	- Alex	No.	Ş	
~ {	825	Ę		And has a	a have	atum	<u>z</u>	
and the second s	0	<u> </u>	ξ ζ			<u>}</u>	Ş	
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	- 8	\$	\$ \$	1	10 Million of all		Ş	
\$3 \$	875	È		Sec. 1	un Mult	un Plan	Ş	
S Sweet and		l {		4			3	
A.	06	ξ			M	N <sub>4</sub>	i i i	
A CONTRACT	۔ ب				1 May	1 Mar	Ş	
, S	92	{		1		E E	Ę.	
X-4M	350	5	5 5	-	and starting		3	
31		Š	\$ 3		and the second s		र्द	
4	675	٤	₹ <del>₹</del>	471/1744	Num		ž	
× ×	- 8-	5	2	an the second	hydr y	han a	Ş	
ξŚ	-0-	5		and the second se	Mala	×.	Ş	
	025	}			-n/wiki	-AMANA-	2	
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		Σ	ξ <b>ξ</b>	s anna an	- Weine	Mark I	Ş	
	1050	Ş	ξ <b>ξ</b>	العراجي	Langer M	Lawlervil	Ş	
Ter	12	■ {		A.	- Million	4866477	A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	
	10	5	55	(normality)	NV.	14 A	5	
and a second	100	>			Hondoni	- Alexander	>	
$\sum$		٤	5 5	Aller	han here h	المعالمي	ž	
<u> </u>	11/25	5	S S		N Nora All	**************************************	Ś	
<u> </u>		2	$\left\{ \right\}$		ANN IN	14. Mar	~	
And a start		~	3 7	~~~~	Anthon,	2.45 M	3	
A MARK	175	Ś	ζζ	and the second se	Maray	and the second sec	ξ	
Assach		2	∑ ≤ ↓	~~~~~	Market Barrier		<u>s</u>	
	1200	2				3	~	
		ζ	ζ ζ	***	Jundy	Arrest	Ş	
	13	Ś	Š Š		M	and the second s	5	
53	250	5		2	S. Martin		5	
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		5	5 5		Muun	Mus	5	
<b>F</b>	1275	3	3	~~~~	Mary M.	No.	3	
<b>\$</b>		2	<i>}</i>		MM	AMM.	2	
and a second	13	Ş	ξζ	an year Arts	MMM.	MMA.	ζ	
2	325	5	SS	A have		2	S	
5		}	<pre> }</pre>		When a		}	
	1350	}	} <b>}</b>	all and a second	MAN	and the second	}	
	75	<b>{</b>			Variance V	No.	<b>↓</b>	
	13	}		A share	-	- manual	}	
a de la companya de l	400	<b> </b>			Lano-Jpage	Land Park	{	
5 FF		{		www		5	l {	
	1425	Į			-	3	l {	
<b>R</b>	50	2	} <b>₹</b>		ANA,		4	
<b>}</b>	4	5	{ {	1 A			Γ ζ	

and a second and the second	00 1575 1550 1525 1500 1475	monumprom		والمحاصرة المحاصر المحادث والمحالية المحالية والمحالية المحالية المحالية المحالية والمحالية والمحالية والمحادية	a deversion of the state of the		
when the shall a superior of the second	2275 225 226 2175 2175 2175 2175 2175 2175 2175 2056 1975 1956 1975 1956 1956 1956 1875 1800 1775 1756 1756 1756 1675 1655 16		A man a second a se		$\left\  \left\  \left$	here have no server and the server of the se	

	Maria				Array Martin	Privale landa	an Longerton		
	and have a second with the second	00 2375 2350 2325			January management	$\left\  \int_{\mathbb{R}^{N}} \left  \int_{\mathbb{R}^{N}} \int_{\mathbb{R}^{N$	Josephan, Property of Suit American Suit African		ENGLISH_HEAC
	And a second of the second of the second	2475 2456 24	- Murring and		and the second for the second second	and an even with the providence by a	hay be sugar and the parameters for		MACASTY
	and and a second of the second	3000 2975 2950 2925 2875 2850 2875 2825 2800 2575 2725 2725 2650 2675 2650 2575 2550 2550 2550	man Mary Way and Mary man war	Munimum Munimum with a second with a second with a second se	Juneary manuscrame and the second of the sec	how we are a series of the ser	have a series of the series of t	monor and monor and	MINGAN_INFER
PETRA 6/6/20	HS=1 15 6:36:25 PM				 				



PETRA 6/6/2015 6:37:47 PM



and a second and a second of the second of the second and the second of the second of the second of the second and the		mmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmm	munition was a second with the second s	٩٩٩٩ مى مەرمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمەمە	۲۰۰۰ میں اور	an a	er versen en son son son son son son son son son so	mmunnummunnumuumuummunnumm	
American Manager and and the second and the second of the second and the second and the second s	and a second	www.	y and a second and a A second a second and a second a second a second	און אנו איין איין איין איין איין איין איין איי		وتحسبت والأواوا والإواوة والإسرامية والأوسرالية ومراجع والمحرور والمحروقين والأروية المريدية ومحاوير والمراوعة ومناصر ومحاول والمراجعة والمحارية والمح	٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩، ١٩٩٩،	have many a second and the second an	VAUREAL_INFE





	825 890 775 750 725 790 675 650 625 60		נוטילעיליאנון ווויל ואיזי איזאלאלי קונעריאיי <sub>א</sub> וערעילי (אויזעעילי איזענוינעריין אילאלאניען איזאלאנעילי איזאייזי אויזעעילאנון אילאנאראלאליאלאלי קונעריאיי אלאלאן אויזעעילי איזענינעריין אילאלאנאניערייען אויאלאנייערייעליי	יינייט מוויניין איני מייני אינט אינט אינט אינט אינט אינט אינט	فتدلجه ويقافه والمحافظ والموصوري والمستخاب المحارك وستأر والمحاط والمحاصة الموساحر والمحافظ والمحافظ والمحافظ والمحافظ فالمحافظ والمحافظ والمحا	مسلحهما واستويه والمحاص واستحسم بالأساط والمحالي والمحالي والمحالية والمالة المحالية والمحالية والمح	mmmmmmmm	
A portanting of the second	940 945 940 875 840		فإعلامهم الإلامية والأخاط والمخاط والمعادم ومعط الماد وطريبها كالها والاردام أمعو	وی در می از می از مین از مین از مین از این	n fan in eine eine eine eine feil oante efficie feil an de efficie feil an de eine feilige feil an de eine feil	roman had provident some for innormoration i soon	John Mary Marine	
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A			אירו איירו אייר	Hard scale procession of the second second with the second s		A second and the second se		ENGLISH_HEAD
Munu and the state of the state	1375 1350 1325 1300 1275 12 WWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWWW	My My My Million	And Alasha Internet (Provide Alasha	and the second	where the state of	where we we will be a series of the series o	and the last and the state of the state of the	MINGAN_SUPE





		MMM		u l'hujnsteeting	had had no should be	warne	
Land Martin Ma		المهوا والمعالية والمحالية والمعالية والمعالية والمحالية المحالية المحالية والمحالية والمحالية والمحالية والمحال	and a second and a s	no hana kasan k	נו, לאיריאין נפריטון אין איילי גאיריטען אין איילי איינייטן פייליל דאיר איזערען אויראראירערער אייראיירער אייראי	والمستحرين والمحمد والمستعمل والمحمل والمحمل والمحمل والمحمد وا	ENGLISH HEAD
0 BZ5 BZ0 BZ5 B00 - 775	And a star for the star of the	אין אין איילאראיי איני איני אין אריייש איניער אייזער אייזער אייזער אייזער אייזער אייזער אייזער אייזער אייזער א	mbundunulunulunulunulunulu	as had a far a	and a superior of the second	- Harris - Lawrence	MACASTY
		A ANNA ANALA		And the second	Ŧ	The second secon	MINGAN_SUPEI
1200 1175 1150 1125 1100 1075 1050 1025 1000 975 950		Manner manager and the second of the Man and the for the second of the s	are a subsequences of the part to a subsequences of the subsequenc	and an and an and a second second second second and the second second and the second second second second second	and a subserve of the state of the state of the second	and a second and the second of the second of the second of the second second second and the second second second	MINGAN_INFER
HS=1							

D015 <u>HCAL_D015 [MM]</u> 100 250 <u>GR [GAPI]</u> 0 150 <u>DPHI_LIM [V/v]</u> 0.45 -(	ILS2 [OHMM]           0.2         2000           ILM2 [OHMM]           0.15         0.2         2000           ILD2 [OHMM]         0.2         0.00           0.15         0.2         2000	DTS_SYNTH [US/M] 500 0 DTCO [US/M] 600 0 DTP_SYNTH [US/M] 500 0	<u>PEF [B/E]</u> 6	DRHO [K/M3] -200 200 RHOB [K/M3] 2000 3000		0 <u>PR</u> 0.5	YM [GPA] 0100	
<pre>control control c</pre>		and and and and and any and the second press of the second and and and and the second and and and and and and a	مريد مراس المركز المحمد محاومهم المحال المربق المحمد المداري المحالية المعاد المحمد المحمد المحمد المحمد المحمد والمحمد	and any and the second of the second of the second of the and the second of t	were were some of the state of the	and a second a	on and the second one was an and and and and and and and and and	BECSIE_E_B_V

Annune and the second state of the second stat		marks Might phane wheel the back of a man summer should be readed		ารกระร <sup>าง</sup> กระหนึ่งได้เราะให้เข้าได้เราะสารกรณาสารกรณาสารกรณาเราะรายการที่ได้เราะให้เป็นเราะสารกรณาเราะรายการกระ	ารางจะใน <sub>การ</sub> เหตุญญายารจากรายเหตุมารถางการการการการการการการการการการการการการก	mer la sum the market belander and a sum of the market belander the	ENGLISH_HEAD
875 880 825 800 7755 7	Alarman Jacob Marked Andrew Marked	אינייניני אינין איניגאינאינט איניגאינאינאיני איניגאינער איניגאין איניאין איניאין אינייי	Mundar March March March 1994	لتدغره ومعادمة والمسالحة المحالية المسالحة والمسالحة والمسالية والمسالحة والمسالحة والمسالحة والمسالحة والمسالحة	M. Sound and million for a strand for the second	Marahan Januar Marahan Jerman Mara	MACASTY
1200 1175 1160 11075 1050 375 950 375 900	A Contraction of the second of	Mark man som and the second of	A second a second with the second	$\int_{0}^{1} \left  \int_{0}^{1} \left  \int_{$	January and a second	and the second the and the for the second of	MINGAN_SUPER
HS=1							

-



Allowed and a second and a se		ייעריאינאניאינאין אייראין אייראייזיין אייראיין אייראיין אייראיין אייראיין אייראיין אייראיין אייראיין אייראיין		nananakan (haranakan)	the strategiction of the strategicture of the strat	An Anna An Anna Anna Anna Anna Anna Ann	- ENGLISH_HEAD
		-source of the state of the source of the	mp July	www	en spracheserver war freezerste such	~~~~~~	ENGLISH_HEAD
14444444444444444444444444444444444444	من والمالية المحالية المحالية المحالية المحالية الم	Hadderly Arrangeness	فللمارد المداد المداد والمعادية والملاسر الموالمل	/Whenhampoor and a standard for the second	JAny Lundvidgergenskahrs Sprached Hours	بالإراد المسار المراجعة والمسالية المسارية المراجع	
		Marina have	hours from	rda, marrisolari (kal	the second law of the second s	James Ly James My Market	- MACASTY - MINGAN_SUPEI
1025 1 1000 975 1 3	annon an	M W Way Way way way way way	And and the second second second	aparamananan gerapati kana Jupang Dr.	and a second	annon an ann an Ann Mary Mary	
1100 1 1075 1 1050	MM Mar Mar Mar Mar Mar Mar Mar Mar Mar M	Month manufactures and the second	and a star and a star and a star a	Mondonananana	Whenhavioring	Man man walk	
00 1175 1150 1125	Manun Mary Marin	harrison of the samples and a start of the start of the		r for the service and the service printing on the form of the service of the serv	Same and the second		
HS=1 PETRA 6/6/2015 6:45:17 PM	• • • • • •	E		*			-

D018 <u>HCAL_D018 [MM]</u> <u>200 300</u> <u>GR [GAPI]</u> <u>0 150</u> <u>NPOR_LIM [V/V]</u> <u>0.45 -0.15</u> <u>NPOR_LIM [V/V]</u> <u>0.45 -0.15</u> <u>0.45 -0.15</u> <u>0.5 -0.15}</u> <u>0.5 -0.15</u> <u>0.5 -0.15}</u> <u>0.5 -0.15} <u>0.5 -0.15}</u> <u>0.5 -0.15}</u> <u>0.5 -0.15}</u> <u>0.5 -0.15}</u> <u>0.5</u></u>	ILS2 [OHMM]         DTS_SYNTH [I           0.2         2000         600           ILM2 [OHMM]         DTCO [US/I           0.2         2000         600           ILD2 [OHMM]         DTP_SYNTH [I           0.2         2000         600	JS/M] 0 M] 0 JS/M] <u>PEF [B/E]</u> 0 2 6	DRHO [K/M3] -200 200 RHOB [K/M3] 2000 3000	VPVS (CTR) 1 3 GTEM [DEGC] 10 40	PR00.5	0 [GPA] 0 100	BECSIE_E_B_
	My Museum many many many many many many many man	how have a server of the second of the secon	- Multiplication and a second a second and a second	The provide states of the stat	When the set of proved brown house proved and house proved and here the meridian from the set of the provided from the set of the provided by	Manual and Marine and Marine and Marine and	VAUREAL_INF ENGLISH_HE ENGLISH_HE MACASTY MINGAN_SUF

PETRA ANTICOSTI

⊢\_\_\_



	WWWWWWWWWWWWW	Andra Adamanda Anta			a particular and the second	white the states and	
750 . 725 . 700 . 675 . 650	MMppppppp	Washington and mark phone and the second	active potentic to the second second	hite stabilization of the	han anglan pangan ang ana ang ang ang ang ang ang an	Hudgemanianability with some	
and a first of the second s	man and a start and a start and the start and the start and a s	มาขึ้น <sup>11</sup> 11เราของเม <mark>ี่มให้</mark> มากมา/งาราชชาวฟ้างมาท่างม <sub>ีสา</sub> กๆงาราปการปล่าง	And a second	and a long of the contract of the second	analausta lopor <sup>Mund</sup> is englassing <mark>kanananan</mark>	mon a substitution of the second states in the bibliothers and	
	My Shaper a substance of the second s	มากการสารสารสารสารสารสารสารสารสารสารสารสารสา	MM Hat was and blood tool when we do not what			بالمسلمين والسلمي المستابا ويتع	ENGLISH_HEAD
	And the second s	And the same of the second section and the second section of the second section of the second se	Anna and the second of the sec			And the second of the second o	MACASTY MINGAN_SUPE
HS=1 PETRA 6/6/2015 6:57:02 PM							

## Annexe 4 :

### Diagrammes binaires des modules élastiques

- Puits D007, D010, D012, D013, D014, D015, D016, D018 et D020 -

WELL: D007 (13429 samples)



PETRA 6/6/2015 7:05:12 PM

WELL: D010 (4291 samples)



WELL: D012 (10028 samples)



PETRA 6/6/2015 7:06:15 PM

WELL: D013 (7370 samples)



PETRA 6/6/2015 7:06:34 PM

WELL: D014 (5529 samples)



WELL: D015 (5297 samples)



PETRA 6/6/2015 7:07:13 PM

WELL: D016 (5718 samples)



WELL: D018 (2819 samples)



PETRA 6/6/2015 7:07:51 PM

WELL: D020 (6397 samples)



### Annexe 5 :

### Diagraphies des paramètres géomécaniques

– Puits D007, D012, D013, D014, D015, D016, D018 et D020 –





		A ANTAL AND			papartic and	
and the second						
have the second and the second of the second		Markin Marking and a second and a second of the second of				VAUREAL_INFE
HS=1	3000 2975 2950 2975 2950 2875 2850 2875 2850 2775 2755 2750 2675 2650 2675 2650 2575 2450 2475 2450 2475 2450	And and a second a second as a	- Munner war war war war war war war war war wa			MACASTY MINGAN_SUPER



and and a second of the second		n-monore	mmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmmm			VAUREAL_INFE
John Marine and Marine a	1375 1350 1325 1300 1275 1250 1225 1200 1175 1150 1125 11	נעמעייני אין אין אין אין אין איזעייני אין יינער אין אין אין אין איזייקרא איזייקרא איזיער איז איז אין איזיער איז	Any have a second a second and a	فالمستعدين والمتعاقبة والمستحد والالترادية والمراجعة والمتوجعة والمتراجع والمراجع والمراجع والمستحد والم	paberes in the second secon	

and a second	1525 1500 1475 1450 1425 1400	serily-marging and preserved with the level of the series	man-man provide a star a st		in all a search of the second s	ENGLISH_HEAD
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	700 1675 1650 1625 1600 1575 1550	And the set of the set	man and a second and a second warding of		and a state of the second stat	MACASTY MINGAN_SUPE
A Contraction of the state of t	1875 1850 1825 1800 1775 1750 1725	เล่นระเหล่านที่ได้เป็นระเหล่าในกรุณีนี้มีที่มีหลังได้ได้ได้ได้ได้เหล่ายายกรุณีเรื่อยาได้เราะที่ได้เหล่านกรุณ	and the second of the property of the second of the second	han-rayahirisanibris-sandrasahikiriyin		
And the second s	2000 1975 1950 1925 1900	A	and many of the share with the same			MINGAN_INFER


Municipal Contraction and Cont	. 825 840 775 750 725 700 675 650 625 60		איינא געוד איירי איין אייר איין איין איין איין איי	mmmmmm		فمسل ويعتقدهم ومعادمهم ومناسط والمحالي والمعاط والمحالي ومحاليه المعالمة والمحافظ والمعادية والمحالية والمحافظ والمعالمة والمعالمة والمعالمة والمعالمة والمحالية و	VAURFAL INFF
man and the second and the second and the second	<u>9\$0 . 9</u> \$2 . 9 <u>00 . 8</u> }2 . 8 <u></u> \$0		Vounders Maharanakorran aroundar faster anarrar vara este	John Southerness		Annone Martin Constant State States and the states of the	
And and a start of the start of	5 1100 1075 1050 1025 1000 975 1		an and an and an an an and an an and an	- Marina Marina		and and a second and a second	ENGLISH_HEAD
Annual and a second a		help	and the second	magness and when we are a second and	A second s	and the second second second and the second s	ENGLISH_HEAD
Manna Anna Anna Anna Anna Anna Anna Anna		And a second sec		And Share Martines and a start and the start	And a second		MINGAN_SUPEI







		— MACASTY
		— MINGAN_SUPEI
H8=1		— MINGAN_INFER

PETRA 6/4

⊢







		ha ya ya na ƙasali na ƙasali na ƙasal	hand a share a share a she	n an an ann an Anna an Anna an Anna		
The store store store	Margaran anna margara		14 Mannana Land Manna	North Contraction and the second s		VAUREAL_INFE
	van her sam her fan set sense	n of the second s	monumeraproversion	man and a second se	A A faire and the second from the second	ENGLISH_HEAD
	responses and the second se	a she i ka sa	hand have been and have been been been been been been been be	- Ala - Island	usida a sa	ENGLISH_HEAD
		aharang barang barah bahar barang	have been and have been and here and	Jan Jack Starting	And a start of the	MACASTY
1125 1150 1125 1100	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	مرجاد برميدانوا ويويا والمان والمالية والمحدم مريد	ירייניאין איזיאיער איזיאינעראיניעראאיין אאייי	مريالا المودية الموادية الموادية الموادية المحادية المحادية المحادية المحادية المحادية المحادية المحادية المحاد		
HS=1 6/6/2015 5:47:42 PM						