# **Caractérisation des argiles du Bas-Saint-Laurent**

Rapport final

Projet de recherche R.729.1

Rapport présenté au

Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports Le 11 octobre 2016

Préparé par

Kevin Hébert, Serge Leroueil et Ariane Locat





# Synthèse des conclusions et recommandations

Les sols argileux du Bas-Saint-Laurent ont la particularité de présenter une couche très raide à dure sur une couche plus molle. La caractérisation géotechnique des sites d'étude de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges a permis de définir les principales caractéristiques physiques, minéralogiques, mécaniques et hydrauliques des silts argileux constituant ces dépôts, et également d'obtenir quelques pistes de réponse quant à la mise en place de ces dépôts. Les essais physico-chimiques et minéralogiques montrent que ces sols sont assez semblables aux autres argiles de l'est du Canada. Un pourcentage de carbonates total d'environ 7 % les différencie cependant des autres argiles de l'est du Canada, dont le pourcentage est d'environ 1 à 2 %. La salinité semble jouer un rôle important au niveau des limites de consistance. La porosimétrie au mercure et la microscopie électronique à balayage ont montré que ces sols possèdent une structure interne très compacte et fermée, contrairement à la structure flocculée très ouverte des autres argiles de l'est du Canada. Les échantillons analysés ne montrent qu'une seule famille d'ouverture de pore (environ 0.1 à 0.2 µm), à l'exception de l'échantillon de l'unité inférieure de l'Isle-Verte, qui en présente une deuxième à 0,6 µm. L'utilisation de la tomodensitométrie a également permis de constater que le sol des unités inférieures est laminé, tandis que celui des unités intermédiaires et supérieures est massif et homogène, avec la présence de graviers.

La réalisation des essais de terrain s'avère difficile sur ces sites dont la consistance des unités supérieures et intermédiaires complique les travaux d'échantillonnage et de caractérisation mécanique. L'essai scissométrique est inutilisable dans ces unités. L'essai pressiométrique peut s'avérer une bonne solution afin d'obtenir une approximation de la résistance au cisaillement non drainé pour les unités supérieures. Des valeurs de  $\beta$ ' entre 10 et 12,5 permettent d'estimer des S<sub>u</sub> qui sont d'un ordre de grandeur similaire à celles déterminées par l'essai au piézocône, avec un paramètre N<sub>kT</sub> de 18. Toutefois, davantage de travaux permettraient de mieux définir ce paramètre. La valeur de N<sub>\sigmat</sub> de 3,4 peut être utilisée pour obtenir un profil de  $\sigma'_p$ , mais elle n'est fondée que sur la relation déduite par Demers et Leroueil (2002), vu la difficulté d'obtenir des valeurs de  $\sigma'_p$  à l'essai oedométrique. Ces corrélations nécessitent une confirmation par davantage de travaux afin d'augmenter la quantité de données, et doivent être utilisées avec prudence. Les deux méthodes d'échantillonnage utilisées pour ce projet, le carottage PQ<sub>3</sub> et les tubes de grand diamètre (120,8 mm), donnent des résultats similaires. Les différences sont faibles entre les deux méthodes et d'autres comparaisons seraient nécessaires pour déterminer si l'une est meilleure que l'autre.

Les résultats des essais oedométriques indiquent des sols très peu compressibles, avec des indices des vides naturels (e<sub>0</sub>) variant entre 0,54 et 0,94 à l'Isle-Verte et entre 0,44 et 0,61 à Notre-Dame-des-Neiges, associés à des indices de compression (C<sub>c</sub>) qui varient entre 0,1 et 0,25. Les courbes de consolidation obtenues ne montrent pas le cassé typique des argiles de la mer de Champlain, mais plutôt l'allure des sols ayant des indices des vides naturels très faibles. La pression de préconsolidation est donc très difficile à obtenir. Les essais triaxiaux CIU ont permis de définir des paramètres de résistance effectifs représentatifs des deux sites, avec un angle de

frottement  $\phi' = 29^\circ$  et une cohésion c' = 10 kPa. À partir des données disponibles, il n'apparaît pas possible de définir des paramètres de résistance drainés différents d'une unité à l'autre. Une plus grande quantité d'essais permettrait éventuellement de définir les enveloppes de résistance pour chacun des sites et des unités de sol.

Le mode de déposition de cette argile massive est toujours une énigme. L'hypothèse avancée est qu'une réavancée glaciaire, entre 12 400 et 12 000 ans B.P. (Hétu, 1998), ait déplacé du matériau argileux déposé à des élévations plus importantes pour ensuite le déposer sur du matériau argileux déjà présent à des élévations plus faibles et ainsi former les dépôts supérieurs et intermédiaires. L'unité inférieure semble à peu près normalement consolidée.

Malgré les connaissances acquises pendant ce projet, il serait nécessaire de poursuivre la collecte de données sur ces sites pour bâtir une base de données plus importante afin de mieux définir les propriétés géotechniques et de pouvoir appuyer davantage les relations définies dans ce rapport. L'information contenue dans ce rapport doit donc être utilisée en étant conscient de ces limitations. L'hypothèse avancée sur le mode de déposition nécessite aussi davantage de travaux de terrain et de laboratoire pour être confirmée.

# Table des matières

Synthèse des conclusions et recommandations	ii
Liste des Tableaux	ix
Liste des Figures	x
Liste des symboles et abbréviations	xiv
Remerciements	xvii
Chapitre 1	1
Introduction	1
1.1 Présentation du projet et problématique	1
1.2 Mandat	1
1.3 Étapes du projet	2
1.4 But du rapport final	2
Figures	3
Chapitre 2	4
Sites investigués	4
2.1 Site 1 : Isle-Verte	4
2.2 Site 2 : Notre-Dame-des-Neiges	4
Figures	5
Chapitre 3	6
Méthodologies	6
3.1 Méthodologie des travaux de terrain	6
3.1.1 Foreuse	6
3.1.2 Carottage PQ <sub>3</sub>	6
3.1.3 Tubes de grand diamètre	7
3.1.4 Piézocône	8
3.1.5 Paraffinage et transport des échantillons	
3.1.6 Essai de pénétration standard	11
3.1.7 Essai pressiométrique	
3.1.8 Piézométrie	
3.1.9 Entreposage des échantillons	
3.2 Méthodologie des travaux de laboratoire	
3.2.1 Essais de caractérisation physique	

3.2.2 Essais de caractérisation minéralogique/géologique	
3.2.3 Essais de caractérisation mécanique	
3.2.4 Mesure de la conductivité hydraulique	
Tableaux	
Figures	
Chapitre 4	
Site de l'Isle-Verte	
4.1 Profil géotechnique de synthèse	
4.2 Stratigraphie générale et hydrogéologie	
4.3 Datation	
4.4 Tomodensitométrie (CT-SCAN)	
4.5 Caractérisation physico-chimique	
4.5.1 Salinité	
4.5.2 Analyses granulométriques	
4.5.3 Teneurs en eau et limites d'Atterberg	
4.6 Caractérisation minéralogique	
4.6.1 Diffraction des rayons X	
4.6.2 Porosimétrie au mercure	
4.6.3 Microscopie électronique à balayage	
4.6.4 Surface spécifique totale	
4.6.5 Capacité d'échange cationique	
4.6.6 Pourcentage de carbonates total (Analyse thermogravimétrique)	
4.6.7 Pourcentage de carbonates total (Chittick)	
4.7 Caractérisation mécanique (terrain)	
4.7.1 Essai de pénétration standard (SPT)	
4.7.2 Essais scissométriques	
4.7.3 Essais au piézocône et au piézocône sismique	
4.7.4 Essais pressiométriques	
4.8 Caractérisation mécanique (laboratoire)	41
4.8.1 Essais oedométriques	41
4.8.2 Essais triaxiaux	
4.9 Caractérisation hydraulique	
4.10 Synthèse des unités de sol de l'Isle-Verte	

4.10.1 Unité supérieure	
4.10.2 Unité intermédiaire	
4.10.3 Unité inférieure	
Tableaux	
Figures	
Chapitre 5	
Site de Notre-Dame-des-Neiges	
5.1 Profil géotechnique de synthèse	
5.2 Stratigraphie générale et hydrogéologie	
5.3 Tomodensitométrie (CT-SCAN)	
5.4 Caractérisation physico-chimique	
5.4.1 Salinité	
5.4.2 Analyse granulométrique	69
5.4.3 Teneurs en eau et limites d'Atterberg	69
5.5 Caractérisation minéralogique	
5.5.1 Diffraction des rayons X	
5.5.2 Porosimétrie au mercure	
5.5.3 Microscopie électronique à balayage	71
5.5.4 Surface spécifique totale	71
5.5.5 Capacité d'échange cationique	71
5.5.6 Pourcentage de carbonates total (Analyse thermogravimétrique)	
5.5.7 Pourcentage de carbonates total (Chittick)	
5.6 Caractérisation mécanique (terrain)	
5.6.1 Essai de pénétration standard (SPT)	
5.6.2 Essais scissométriques	
5.6.3 Essais au piézocône et au piézocône sismique	
5.7 Caractérisation mécanique (laboratoire)	
5.7.1 Essais oedométriques	
5.7.2 Essais triaxiaux	
5.8 Caractérisation hydraulique	
5.9 Synthèse des unités de sol de Notre-Dame-des-Neiges	
5.9.1 Unité supérieure	
5.9.2 Unité intermédiaire	

5.9.3 Unité inférieure	79
Tableaux	81
Figures	83
Chapitre 6	99
Géologie régionale des dépôts argileux	99
6.1 Analyse spatiale des dépôts	99
6.2 Déglaciation wisconsinienne et hypothèse de la mise en place des dépôts	100
Figures	103
Chapitre 7	108
Propriétés caractéristiques des dépôts argileux	108
7.1 Discussion sur les résultats obtenus et corrélations	108
7.1.1 Caractérisation physico-chimique	108
7.1.2 Caractérisation minéralogique	110
7.1.3 Caractérisation mécanique	113
7.1.4 Caractérisation hydraulique	123
7.2 Effet de l'échantillonnage sur les résultats	124
7.2.1 Échantillonnage par tube de grand diamètre	125
7.2.2 Échantillonnage par carottage	125
7.2.3 Comparaison des deux techniques d'échantillonnage à partir des résultats de laboratoire	126
7.2.4 Synthèse sur les méthodes d'échantillonnage	127
Tableaux	129
Figures	132
Chapitre 8	149
Conclusion	149
8.1 Conclusion du projet	149
8.1.1 Rappel des objectifs initiaux	149
8.1.2 Portrait global des résultats	149
8.1.3 Recommandations	154
8.2 Ouverture sur la suite du projet	155
Chapitre 9	156
Références	156
Annexes	161
Annexe A : Isle-Verte	163

Annexe B : Notre-Dame-des-Neiges	254
Annexe C : Trois-Pistoles	352
Annexe D : Géologie des dépôts argileux	358
Annexe E : Traitement des données de l'essai triaxial	369

# Liste des Tableaux

# Chapitre 3

Tableau 3 - 1	· Paramètres	aéométrique	es des tubes	d'échantillonnage	de 120.8	mm	- 26
		goomounque		a oonananonnago	ao 120,0		

# Chapitre 4

Tableau 4 - 1 : Synthèse des essais de terrain pour le site de l'Isle-Verte en fonction des différentes	
campagnes géotechniques	47
Tableau 4 - 2 : Synthèse des essais de laboratoire pour le site de l'Isle-Verte en fonction des différentes	
campagnes géotechniques	47
Tableau 4 - 3 : Présentation des indices de compression et de recompression pour le site de l'Isle-Verte à	
partir des essais oedométriques	48
Tableau 4 - 4 : $\sigma'_{v0}$ correspondant à la contrainte de consolidation pour les essais triaxiaux, avec $\sigma'_p$ dédui	t
du profil de piézocône CM-03	48

# Chapitre 5

Tableau 5 - 1 : Synthèse des essais de terrain pour le site de Notre-Dame-des-Neiges en fonction des	
différentes campagnes géotechniques	. 81
Tableau 5 - 2 : Synthèse des essais de laboratoire pour le site de Notre-Dame-des-Neiges en fonction de	es
différentes campagnes géotechniques	. 81
Tableau 5 - 3 : Présentation des indices de compression et de recompression pour le site de Notre-Dame	<del>)</del> -
des-Neiges à partir des essais oedométriques	. 82
Tableau 5 - 4 : $\sigma'_{v0}$ correspondant à la contrainte de consolidation pour les essais triaxiaux, avec $\sigma'_p$ dédu	uit
du profil de piézocône CM-05	. 82

Tableau 7 - 1 : Comparaison du pourcentage de carbonates total par les méthodes Chittick et ATG	.129
Tableau 7 - 2 : Résultats des relations $S_{uv}/\sigma'_{v0}$ et $S_{uv}/\sigma'_p$ en fonction de l'indice de plasticité pour les deu	XL
sites d'étude	129
Tableau 7 - 3 : Comparaison des caractéristiques de compression pour les deux sites	130
Tableau 7 - 4 : Comparaison des propriétés hydrauliques pour les deux sites	131
Tableau 7 - 5 : Comparaison des propriétés géométriques des tubes de grand diamètre utilisés dans ce	
projet et du tube de l'échantillonneur Laval (La Rochelle et al., 1981)	131

# Liste des Figures

## Chapitre 1

Figure 1 - 1 : Profil de résistance en pointe (CPTu) sur un site situé à l'est de Trois-Pistoles (c62006b)...... 3

### Chapitre 2

Figure 2 - 1 : Vue d'ensemble présentant les différents sites d'étude choisis – Projet de recherche R729.1.5

## Chapitre 3

Figure 3 - 1 : Comparaison des tubes de 120,8 mm de diamètre intérieur avec le tube Shelby modifié (à	
gauche)	?7
Figure 3 - 2 : Présentation du rapport de surface (Ar) et du rapport de dégagement intérieur (ICR) et schém	а
de tube avec ou sans dégagement intérieur (ICR) (La Rochelle et al., 1981)	8
Figure 3 - 3 : Schéma montrant l'angle de coupe $lpha$ (modifié de Clayton et al., 1995)	28
Figure 3 - 4 : Déformations axiales le long d'une ligne centrale d'un échantillonneur idéalisé (Clayton, 1995	)
	9
Figure 3 - 5 : Abaque de salinité pour l'estimation de la salinité des différents échantillons	0
Figure 3 - 6 : Schéma montrant les axes utilisés pour la tomodensitométrie (CT-SCAN)	0
Figure 3 - 7 : Contrepression requise en fonction du degré de saturation initial et final (modifiée de la norme	Э
ASTM D4767-11)	51

Figure 4 - 1 : Site d'étude de l'Isle-Verte – Travaux de terrain de 2006 et de 2014	. 49
Figure 4 - 2 : Profil de synthèse pour le site de l'Isle-Verte	. 50
Figure 4 - 3 : Fissure de matière organique dans l'échantillon S2-TM2 du site de l'Isle-Verte	. 51
Figure 4 - 4 : Coquillage récupéré dans les échantillons de l'Isle-Verte	. 51
Figure 4 - 5 : CT-SCAN TM-02 – unité supérieure	. 52
Figure 4 - 6 : CT-SCAN TM-04 – unité intermédiaire	. 52
Figure 4 - 7 : CT-SCAN TM-06 – unité inférieure	. 52
Figure 4 - 8 : Résultats de l'essai de porosimétrie au mercure pour le site de l'Isle-Verte	. 53
Figure 4 - 9 : Images du MEB de l'échantillon CR2-B de l'unité supérieure du site de l'Isle-Verte	. 54
Figure 4 - 10 : Images du MEB de l'échantillon S2-TM6 de l'unité inférieure du site de l'Isle-Verte	. 55
Figure 4 - 11 : Deuxième série d'images du MEB de l'échantillon S2-TM6 de l'unité inférieure du site de	
l'Isle-Verte	. 56
Figure 4 - 12 : Profil des modules pressiométriques au site de l'Isle-Verte	. 57
Figure 4 - 13 : Profil de résistance au cisaillement non drainé déduite des essais pressiométriques au site	Э
de l'Isle-Verte pour un $\beta$ ' = 11	. 58
Figure 4 - 14 : Comparaison des essais oedométriques CR2-A et S2-TM1 (élévation d'environ 19,50 m)	. 59
Figure 4 - 15 : Comparaison des essais oedométriques CR4-A et S2-TM2 (élévation d'environ 16,15 m)	. 59
Figure 4 - 16 : Photo des échantillons cisaillés au triaxial suite au passage à l'étuve	. 60
Figure 4 - 17 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – CR2-C et S2-TM1 – Isle-Verte.	. 61
Figure 4 - 18 : Comparaison des variations des pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – CR2-C	Cet
S2-TM1 – Isle-Verte	. 61

Figure 4 - 19 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) - CR2-C et S2-TM1 - Isle-Verte 62
Figure 4 - 20 : Comparaison du comportement contrainte - déformation - CR4-C et S1-TM2 - Isle-Verte. 62
Figure 4 - 21 : Comparaison des variations des pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU - CR4-C et
S1-TM2 – Isle-Verte
Figure 4 - 22 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) - CR4-C et S1-TM2 - Isle-Verte 63
Figure 4 - 23 : Comportements contrainte – déformation de tous les essais CIU réalisés sur les échantillons
du site de l'Isle-Verte
Figure 4 - 24 : Analyse des essais triaxiaux CIU pour le site de l'Isle-Verte après consolidation près de la
contrainte effective moyenne en place
Figure 4 - 25 : Profil des résistances au cisaillement non drainé obtenues à la suite des essais triaxiaux CIU
après consolidation à des contraintes voisines des contraintes en place au site de l'Isle-Verte

Figure 5 - 1 : Site d'étude de Notre-Dame-des-Neiges – Travaux de terrain 2008 – 2014
Figure 5 - 3 : CT-SCAN TM-01 – unité supérieure
Figure 5 - 4 : CT-SCAN TM-05 – unité intermédiaire
Figure 5 - 5 : CT-SCAN TM-06 – unité inférieure
Figure 5 - 6 : Résultats de l'essai de porosimétrie au mercure pour le site de Notre-Dame-des-Neiges 86
Figure 5 - 7 : Images du MEB de l'échantillon S1-TM3 de l'unité supérieure du site de Notre-Dame-des-
Neiges
Figure 5 - 8 : Images du MEB de l'échantillon S1-TM6 de l'unité inférieure du site de Notre-Dame-des-
Neiges
Figure 5 - 9 : Deuxième série d'images du MEB de l'échantillon S1-TM6 de l'unité inférieure du site de
Notre-Dame-des-Neiges
Figure 5 - 10 : Comparaison des essais oedométriques CR1-B et S2-TM1 (élévation d'environ 72,65 m) 90
Figure 5 - 11 : Comparaison des essais oedométriques CR5-B et S3-TM2 (élévation d'environ 69,70 m) 90
Figure 5 - 12 : Comparaison des essais oedométriques CR8-A et S2-TM4 (élévation d'environ 65,20 m) 91
Figure 5 - 13 : Comparaison des essais oedométriques CR13-A et S1-TM6 (élévation d'environ 59,40 m) 91
Figure 5 - 14 : Photo des échantillons cisaillés au triaxial suite au passage à l'étuve
Figure 5 - 15 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – S1-TM1 et CR1-B – Notre-Dame-
des-Neiges
Figure 5 - 16 : Comparaison des variations de pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – S1-TM1 et
CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges
Figure 5 - 17 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) – S1-TM1 et CR1-B – Notre-Dame-
des-Neiges
Figure 5 - 18 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – CR13-B et S2-TM6 – Notre-
Dame-des-Neiges
Figure 5 - 19 : Comparaison des variations de pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – S2-TM6 et
CR13-B – Notre-Dame-des-Neiges
Figure 5 - 20 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) – CR13-B et S2-TM6 – Notre-
Dame-des-Neiges
Figure 5 - 21 : Comportements contrainte – déformation de tous les essais CIU réalisés sur les échantillons
du site de Notre-Dame-des-Neiges

Figure 5 - 22 : Analyse des essais triaxiaux CIU pour le site de Notre-Dame-des-Neiges après consolidation	I
près de la contrainte effective moyenne en place97	7
Figure 5 - 23 : Profil des résistances au cisaillement non drainé obtenues à la suite des essais triaxiaux CIU	
après consolidation à des contraintes voisines des contraintes en place au site de Notre-Dame-des-Neiges	
	3

# Chapitre 6

Figure 6 - 1 : Carte de la région du Bas-Saint-Laurent où l'anomalie stratigraphique a été détectée par	
certains travaux du MTMDET (provenance MTMDET)	103
Figure 6 - 2 : Position des fronts de glace durant le retrait de la calotte glaciaire Wisconinienne (tirée	
d'Occhietti et al., 2011)	104
Figure 6 - 3 : Corrélations entre les unités stratigraphiques de la région Baie-des-Sables – Trois-Pistoles	
perpendiculairement à l'estuaire du Saint-Laurent (Locat, 1978)	105
Figure 6 - 4 : Corrélations entre les sédiments marins et les sédiments d'origine marine - Coupe parallèle	àà
l'estuaire du Saint-Laurent (Locat, 1978)	106
Figure 6 - 5 : Courbe généralisée du niveau marin relatif ou de l'émersion des terres dans la région de	
Rivière-du-Loup basée sur les dates au <sup>14</sup> C disponibles (tirée de Dionne, 2002)	107

Figure 7 - 1 : Relation $w_L - I_P$ pour les échantillons des deux sites à l'étude. Limites pour les argiles
Champlain selon Leroueil et al. (1983)
Figure 7 - 2 : Représentation de l'activité pour les échantillons des deux sites à l'étude. Limites pour les
argiles Champlain selon Leroueil et al. (1983)133
Figure 7 - 3 : Comparaison des familles d'ouverture de pores pour les unités supérieures et inférieures de
chacun des deux sites d'étude134
Figure 7 - 4 : Comparaison de la structure interne au MEB des unités supérieures et inférieures de chacun
des deux sites d'étude
Figure 7 - 5 : Diverses relations entre l'indice de plasticité (Ip), la fraction argileuse (CF), la capacité
d'échange cationique (CEC) et la surface spécifique totale (SSA) pour différents sols (modifiée de Locat et
al., 2003)
Figure 7 - 6 : Relation entre l'activité des sols (Ac) et la surface spécifique des argiles (Sc) déterminée par la
méthode du bleu de méthylène (modifiée de Locat et al., 2003)
Figure 7 - 7 : Corrélation entre l'indice de plasticité et le rapport S <sub>uUU</sub> /N <sub>60</sub> (Stroud, 1974)137
Figure 7 - 8 : Relation entre la résistance au cisaillement non drainé déduite des essais SPT et les différents
profils de résistance au cisaillement non drainé obtenus suite aux essais pressiométriques, aux essais
triaxiaux CIU, aux piézocône et piézocône sismique et aux essais scissométriques pour le site de l'Isle-
Verte
Figure 7 - 9 : Relation entre la résistance au cisaillement non drainé déduite des essais SPT et les différents
profils de résistance au cisaillement non drainé obtenus suite aux essais triaxiaux CIU, aux piézocône et
piézcône sismique et aux essais scissométriques pour le site de Notre-Dame-des-Neiges
Figure 7 - 10 : Relation entre $S_{uv}/\sigma'_{v0}$ et $S_{uv}/\sigma'_{p}$ en fonction de l'indice de plasticité pour les sols des deux
sites d'étude par rapport aux argiles de l'est du Canada et du Japon (modifié de Leroueil & Hight, 2003).140

Figure 7 - 11 : Profils de la résistance en pointe (q <sub>t</sub> ) et de la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol
(Vs) obtenue par différentes méthodes de calcul à partir du piézocône et pour la mesure réelle sur le terrain
pour le piézocône CM-03 au site de l'Isle-Verte141
Figure 7 - 12 : Profils de la résistance en pointe (q <sub>t</sub> ) et de la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol
(Vs) obtenue par différentes méthodes de calcul à partir du piézocône et pour la mesure réelle sur le terrain
pour le piézocône CM-05 au site de Notre-Dame-des-Neiges142
Figure 7 - 13 : Modules à petites déformations (G <sub>max</sub> ) en fonction des différentes unités de sol du site de
l'Isle-Verte143
Figure 7 - 14 : Modules à petites déformations (G <sub>max</sub> ) en fonction des différentes unités de sol du site de
Notre-Dame-des-Neiges
Figure 7 - 15 : Relation entre la pression limite (PL) déduite d'essais pressiométriques de type Ménard et la
résistance au cisaillement non drainé, en fonction du paramètre $\beta$ '. Pour les essais de la présente étude, les pressions limites étaient connues et les résistances au cisaillement non drainé sont estimées pour
différentes valeurs de β' (modifiée de Leroueil et al., 1983)145
Figure 7 - 16 : Relation générale entre l'indice de compression, l'indice des vides naturel et la sensibilité
incluant les résultats du projet de recherche (modifiée de Leroueil et al., 1983)146
Figure 7 - 17 : Relation entre l'indice des vides naturel et l'indice de compression pour les sols des deux
sites à l'étude
Figure 7 - 18 : Synthèse des essais triaxiaux CIU consolidé à la contrainte effective verticale en place et
paramètres de résistance moyens pour l'enveloppe de résistance147
Figure 7 - 19 : Relation entre l'indice de variation de perméabilité $c_k$ et l'indice des vides naturel $e_0$ (modifiée de Leroueil & Hight, 2003)

# Liste des symboles et abbréviations

A : aire normale à l'écoulement de l'échantillon de sol

a : aire du tube de mesure pour l'essai de perméabilité

A<sub>c</sub> : activité

Ar : rapport de surface d'un tube d'échantillonnage

ATG : analyse thermogravimétrique

B : diamètre extérieur (même chose que Dw)

 $B_q$ : rapport de l'excédant de pression interstitielle (u-u<sub>0</sub>) sur la résistance en pointe nette (q<sub>t</sub>- $\sigma_{v0}$ )

C-0X : essai au piézocône

CM-0X : essai au piézocône sismique

C<sub>B</sub> : facteur de correction pour le diamètre du trou de forage

C<sub>c</sub> : indice de compression

C<sub>E</sub> : facteur de correction pour l'énergie transmise

CEC : capacité d'échange cationique

CF : fraction argileuse

ck : coefficient de perméabilité

CPTu : essai au piézocône

C<sub>R</sub> : facteur de correction pour la longueur du train de tiges

Cs : facteur de correction pour le type d'échantillonneur

C<sub>s</sub> : indice de recompression

Cs d-r : indice de recompression en déchargement-rechargement

C<sub>u</sub> : résistance au cisaillement non drainé résultat de l'essai triaxial

c' : cohésion

D : Diamètre d'ouverture du pore

De : diamètre d'ouverture

Ds : diamètre intérieur

D<sub>w</sub> : diamètre extérieur

e : indice des vides

 $E_M$  : module pressiométrique

e<sub>0</sub> : indice des vides naturel

fs : frottement développé lors de l'essai au piézocône

F<sub>r</sub>: rapport de frottement normalisé 
$$\frac{f_s}{q_t - \sigma_v} * 100$$

G<sub>max</sub> : Module de cisaillement maximal

 $I_c$  : indice de comportement du sol

ICR : rapport de dégagement intérieur d'un tube mince

IL : indice de liquidité

I<sub>p</sub> : indice de plasticité

k : perméabilité

k<sub>0</sub> : perméabilité à l'indice des vides naturel

L : hauteur de l'échantillon

N : indice N mesuré lors de l'essai de pénétration standard (SPT)

(N)<sub>60</sub> : indice N corrigé pour différents facteurs  $(N)_{60} = N_m C_E C_R C_B C_S$ 

 $N_{kT}$  : paramètre permettant de déduire la résistance au cisaillement non drainé de l'essai au piézocône

N<sub>m</sub> : indice N mesuré sur le terrain

 $N_{\sigma^T}$  : paramètre permettant de déduire la résistance au cisaillement non drainé de l'essai au piézocône

OCR : rapport de surconsolidation

P = Pression d'entrée du mercure

pa : pression atmosphérique

P<sub>L</sub> : pression limite

q<sub>c</sub> : résistance en pointe

qt : résistance en pointe corrigée

qt-σv0: résistance en pointe nette

Q : quantité totale d'eau durant un intervalle de temps

$$\mathsf{Q}_{\mathsf{t1}}:\frac{q_t-\sigma_v}{\sigma'_v}$$

S<sub>c</sub> : surface spécifique des argiles

Sr : degré de saturation

S<sub>s</sub> : surface spécifique

SSA : surface spécifique totale

S<sub>u</sub> : résistance au cisaillement non drainé

Suv : résistance au cisaillement non drainé mesurée au scissomètre de chantier

SuPressio : résistance au cisaillement non drainé déduite de l'essai pressiométrique

 $S_{u \cup U}$  : résistance au cisaillement non drainé non confiné

s': 
$$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$$
  
t:  $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{3}$ 

 $t: \frac{1}{2}$ 

t : épaisseur de la paroi d'un tube mince

t: temps

u : pression interstitielle générée à l'arrière du cône (u<sub>2</sub>) lors de l'essai au piézocône

u<sub>0</sub> : pression interstitielle

Vs : vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol

w : teneur en eau

w<sub>L</sub> : limite de liquidité

w<sub>moy</sub> : teneur en eau moyenne du tube

woedo : teneur en eau à partir des échantillons pour les essais oedométriques

w<sub>p</sub> : limite de plasticité

- $\alpha$  : angle du plan de rupture par cisaillement de l'essai triaxial
- $\boldsymbol{\alpha}$  : angle de coupe d'un tube mince
- $\alpha_{\text{vs}} \text{ : } 100.55^{\text{*}\text{Ic}}\text{+}1.68$
- $\beta$  : coefficient théorique pour la détermination de Su au pressiomètre
- $\gamma$  = Tension de surface du mercure (0,485 N/m à 25°C)
- $\Delta h$  : charge hydraulique
- $\boldsymbol{\epsilon}$  : déformations
- $\theta$  = Angle de contact (130°)
- $\phi$ ' : angle de frottement
- $\rho$  : masse volumique
- $\sigma_{\text{h0}}$  : contrainte horizontale totale en place
- $\sigma_v$  : contrainte verticale totale
- $\sigma_{\text{v0}}$  : contrainte verticale totale en place
- $\sigma'_p$  : pression de préconsolidation
- $\sigma'_{\nu}$  : contrainte verticale effective
- $\sigma'_{\text{v0}}$  : contrainte verticale effective en place

# Remerciements

Ce projet n'aurait pas pu se réaliser sans le support financier et la participation du Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports et de ses membres faisant parti du projet, soit : Maxime Bolduc, Marie-Christine Delisle, Denis Demers, Antony Gagné et Catherine Ledoux. Les auteurs remercient donc ces collaborateurs ainsi que Sophie Pelletier, qui a été impliquée dans les premières campagnes géotechniques des deux sites d'études du projet. De plus, la réalisation des essais de caractérisation mécanique en laboratoire a été possible grâce à M. Christian Juneau du département de Génie Civil et Génie des Eaux et les essais de caractérisation minéralogique ont été réalisés par M. Martin Plante et l'équipe du laboratoire de microanalyse du département de Géologie et Génie Géologique de l'Université Laval. Les auteurs veulent donc les remercier, ainsi que M. Bernard Hétu et M. Jacques Locat pour leurs conseils tout au long du projet.

# Chapitre 1 Introduction

# 1.1 Présentation du projet et problématique

Le Ministère des Transports du Québec (MTMDET) a comme mandat de réaliser l'extension de l'autoroute 20, de Cacouna jusqu'à Rimouski, dans la région du Bas-Saint-Laurent. Plusieurs campagnes géotechniques ont été réalisées dans la région, révélant une anomalie concernant les dépôts de sols cohérents de la région. En effet, une partie du territoire présente une couche de sol cohérent (silt argileux) très raide à dure qui repose sur une couche de sol de consistance ferme à raide (silt argileux à argile silteuse). La Figure 1 - 1 présente un profil de piézocone réalisé dans la région de Trois-Pistoles, qui présente cette anomalie stratigraphique. Le profil de résistance en pointe montre bien la démarcation franche qui sépare les unités stratigraphiques. La consistance de la couche supérieure fait en sorte qu'il est difficile de prédire le comportement d'ouvrages, car les propriétés de cette couche de sol très raide à dure ne sont pas bien connues. De plus, la présence de cette couche rend difficile l'investigation de la couche inférieure qui souvent contrôle le comportement des structures construites.

# 1.2 Mandat

C'est dans ce contexte que le MTMDET a demandé à l'Université Laval d'étudier conjointement ce dépôt (projet de recherche R.729.1). Le projet de caractérisation des argiles du Bas-Saint-Laurent permettra de vérifier l'application des corrélations propres aux argiles de la mer de Champlain (Leroueil et al, 1983), aux argiles du Bas-Saint-Laurent, ou d'établir de nouvelles corrélations en fonction des résultats de terrain obtenus. Le projet devrait éventuellement permettre de déterminer les propriétés de ces sols cohérents, en établissant un profil géotechnique complet sur deux sites spécifiques, soit le site de l'Isle-Verte et le site de Notre-Dame-des-Neiges. De plus, un site à Trois-Pistoles, où des piézocônes ont été réalisés (Figure 1 - 1), pourrait s'avérer important pour la compréhension géologique des dépôts de la région. L'explication géologique du dépôt d'argile raide à dure sera abordée dans ce projet, mais elle nécessitera l'examen d'autres profils géotechniques et possiblement davantage de travaux de terrain. Étant donnée la difficulté de l'échantillonnage de l'unité de sol cohérent très raide, deux méthodes ont été retenues afin d'obtenir des échantillons de la meilleure qualité possible dans le présent projet. Les essais de consolidation devraient permettre de juger de la qualité de l'échantillonnage et par le fait même, de permettre au MTMDET de se fier sur une méthode d'échantillonnage en particulier pour les futures campagnes d'investigation de ce sol particulier. Les essais triaxiaux permettront d'analyser le comportement mécanique de ces sols et d'obtenir des paramètres de résistance.

# 1.3 Étapes du projet

Le projet de recherche se divise en 5 étapes :

- Examen des données géotechniques disponibles dans la région du Bas-Saint-Laurent afin d'identifier le ou les sites qui conviendrait le mieux pour la réalisation du projet de recherche;
- 2) Caractérisation géotechnique des deux sites;
- 3) Élaboration de corrélations entre les propriétés et comparaison de ces dernières avec celles établies pour les argiles de la mer de Champlain;
- Examen de profils géotechniques de la région du Bas-Saint-Laurent afin de préciser l'étendue du dépôt d'argile raide;
- 5) Recherche préliminaire d'une explication géologique à l'existence d'une couche argileuse très raide à dure au-dessus d'une couche ferme.

# 1.4 But du rapport final

Le rapport final a pour but de faire une synthèse des informations obtenues sur les deux sites d'étude, et de rendre le tout disponible en un seul rapport utilisable par le MTMDET dans leurs futurs travaux de terrain dans la région. Ce rapport comprend le choix des sites investigués (Chapitre 2), la méthodologie des travaux de terrain et de laboratoire (Chapitre 3), la présentation des données et résultats des sites de l'Isle-Verte (Chapitre 4) et de Notre-Dame-des-Neiges (Chapitre 5), la géologie régionale des dépôts argileux (Chapitre 6), ainsi que l'analyse des propriétés caractéristiques des dépôts et l'influence de l'échantillonnage sur les résultats (Chapitre 7). Quelques recommandations par rapport aux travaux de terrain sont également apportées en fonction des résultats obtenus.

# Figures



Figure 1 - 1 : Profil de résistance en pointe (CPTu) sur un site situé à l'est de Trois-Pistoles (c62006b)

# Chapitre 2 Sites investigués

Ce chapitre présente les deux sites d'étude choisis pour ce projet. Dans les deux cas, des travaux de terrain avaient déjà été réalisés, révélant la présence de cette anomalie stratigraphique. Par le fait même, des données géotechniques étaient donc déjà disponibles. Les principaux critères pour le choix des sites ont été la présence de l'anomalie stratigraphique, des données géotechniques déjà disponibles ainsi que l'accessibilité au terrain pour compléter une campagne de caractérisation géotechnique. La Figure 2 - 1 présente la localisation générale des sites de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges sur le territoire québécois. Ces deux sites à l'étude sont séparés par une distance linéaire d'environ 16 km, le site de Notre-Dame-des-Neiges étant celui le plus à l'est. Ils se situent sur la côte sud du Fleuve Saint-Laurent et les sols argileux s'y retrouvant ont été déposés lors de la submersion marine par la mer de Goldthwait pendant la dernière période glaciaire.

# 2.1 Site 1 : Isle-Verte

Le premier site se situe près de la municipalité de l'Isle-Verte, au croisement de l'autoroute 20 et du pont d'étagement de la route Coteau-des-Érables. C'est à cet endroit que les usagers de la route empruntent le viaduc pour rejoindre la route 132, car c'est la fin actuelle de la partie utilisable de l'autoroute 20. Une campagne géotechnique a été effectuée à cet endroit au printemps 2006, avant le début des travaux de construction, et ces travaux ont permis de révéler la présence de l'anomalie stratigraphique à cet endroit. L'accessibilité y est très facile en utilisant la portion non accessible aux usagers.

# 2.2 Site 2 : Notre-Dame-des-Neiges

Le deuxième site à l'étude, celui de Notre-Dame-des-Neiges, se situe au niveau de l'emplacement de la culée ouest du futur pont qui surplombera la rivière Trois-Pistoles. Il est donc situé au sud de la route 132, dans la colline derrière le Motel Rivière Trois-Pistoles. Les premiers travaux sur ce site ont été effectués au printemps 2008. Une deuxième campagne a eu lieu à l'automne 2012 et à l'été 2013. Le site étant en pleins travaux, l'accessibilité y est plutôt facile. Le site d'essai se situe près de la future culée ouest qui sera accessible par un chemin d'accès pour l'inspection. Au moment de la campagne de terrain 2014, ce chemin d'accès n'était pas complété, mais l'utilisation d'une foreuse à chenille et d'un véhicule tout terrain a rendu les travaux facilement réalisables.

# Figures



Figure 2 - 1 : Vue d'ensemble présentant les différents sites d'étude choisis – Projet de recherche R729.1

# Chapitre 3 Méthodologies

Ce chapitre présente les différentes méthodologies qui ont permis la réalisation des essais de terrain et de laboratoire pour le projet de recherche, tant au niveau des équipements que des procédures.

## 3.1 Méthodologie des travaux de terrain

## 3.1.1 Foreuse

La foreuse qui a été utilisée pour les travaux est une Diedrich D-50, de la compagnie Forages Comeau Inc. Elle est montée sur la base d'une pelle mécanique avec chenilles. Le poids de celleci est d'environ 12 tonnes (charge morte) et elle possède un bâti de poussée amovible d'une capacité de 30 tonnes qui s'installe au centre de la foreuse. Le poids de 12 tonnes de la foreuse limite la capacité de poussée à cette charge. Toutefois, l'utilisation d'ancrages (tarrières de 25,4 cm de diamètre) dans le sol ainsi que l'ajout de poids supplémentaire, tel que des tubages d'acier, permettent de gagner quelques tonnes supplémentaires et ainsi augmenter la capacité de poussée. De plus, la foreuse est équipée d'un marteau hydraulique automatique permettant de réaliser l'essai de pénétration standard (SPT).

## 3.1.2 Carottage PQ<sub>3</sub>

Un carottier à câble a été utilisé afin d'éviter de devoir retirer la totalité des tiges de forage entre deux courses de carottier. Comme l'échantillon de sol doit être le plus intact possible, l'utilisation d'un carottier à triple paroi a été retenue. En plus d'être muni d'un tubage interne permettant de protéger la carotte contre le fluide de forage, il est également muni d'un tube intérieur fendu en aluminium qui permet de retirer facilement l'échantillon. Ce tube s'ouvre sur toute sa longueur. Ce système permet de minimiser le remaniement des échantillons récupérés. Le calibre de carottier PQ<sub>3</sub> permet la récupération d'échantillons de 83 mm de diamètre. De plus, le carottier est muni d'un manchon aléseur sur le tube externe. Ce manchon permet notamment de minimiser les vibrations lors du forage, ce qui permet d'obtenir un trou de diamètre constant et également de minimiser l'usure du tube extérieur. La couronne du carottier utilisée ici est une couronne diamantée de calibre PQ<sub>3</sub>.

Afin de pouvoir carotter le sol, il faut d'abord réaliser un avant-trou par rotation à l'aide d'un tubage de calibre PW (diamètre interne de 127 mm), avant de descendre le carottier PQ<sub>3</sub>. Suite à l'insertion du tubage de calibre P, le carottier est descendu à la profondeur d'échantillonnage désirée et la récupération peut avoir lieu. Les courses du carottier varient entre 76,25 cm et 152,5 cm. Une fois la course complétée, un récupérateur de carottier est envoyé dans le forage afin de le récupérer et retirer la carotte de sol. Lorsque la carotte est remontée à la surface, celle-ci est

examinée afin de vérifier si le carottage a trop endommagé l'échantillon. La carotte est ensuite glissée du tube d'aluminium vers un tube en « PVC » pour faciliter les manipulations. La portion intacte est ensuite découpée en échantillons de longueur variant entre 10 et 15 cm et la couche externe de l'échantillon est enlevée à l'aide d'un petit grattoir (servant également à couper l'échantillon). Cette couche est composée de sol remanié par le fluide de forage et peut induire des variations de teneur en eau dans l'échantillon (Gasparre, 2005). Les échantillons sont ensuite prêts à être scellés. Une fois la carotte découpée, une quantité de sol (entre 10 et 30 g) est recueillie avec une petite spatule de la partie non utilisée de la carotte et placée dans une petite fiole de plastique fermée avec un bouchon, afin d'en déterminer la teneur en eau. Ces fioles sont placées avec les carottes dans les contenants de transport permettant de minimiser les chocs.

#### 3.1.3 Tubes de grand diamètre

Deux types de tubes de grand diamètre ont été utilisés pour échantillonner les sols cohérents (Figure 3 - 1). Dans les deux cas, il s'agit de tubes possédant un diamètre intérieur de 120,8 mm. Le premier type possède des parois d'une épaisseur de 3,1 mm (tube mince) et le deuxième des parois de 6,35 mm (tube épais). L'utilisation de tubes Shelby n'est pas possible à cause de la consistance raide du sol à échantillonner, ainsi qu'à la présence de graviers et cailloux. Les tubes de 6,35 mm d'épaisseur de paroi ont été usinés à la demande du MTMDET. Un total de 5 tubes de cette épaisseur ont été utilisés. Le Tableau 3 - 1 présente les caractéristiques géométriques des deux types de tubes utilisés. Les paramètres les plus importants à tenir compte sont le rapport de surface (A<sub>r</sub>), le rapport de dégagement intérieur du tube (ICR) et l'angle de coupe  $\alpha$ . La Figure 3 - 2 présente le schéma pour déterminer le rapport de surface ainsi que le rapport de dégagement intérieur du tube. Le diamètre du tube est un paramètre secondaire et un plus grand diamètre du tube ne signifie pas un échantillon de meilleur qualité (La Rochelle et al., 1988b). Ce paramètre influence moins le remaniement que les trois autres.

Le rapport de surface (A<sub>r</sub>) et le rapport de dégagement intérieur (ICR) sont définis par ces équations (La Rochelle et al., 1981) :

$$A_{r} = \frac{D_{w}^{2} - D_{e}^{2}}{D_{e}^{2}} * 100$$
$$ICR = \frac{D_{s} - D_{e}}{D_{e}} * 100$$

où :

D<sub>w</sub> = Diamètre extérieur D<sub>s</sub> = Diamètre intérieur D<sub>e</sub> = Diamètre d'ouverture Dans le cas d'un tube avec un rapport de dégagement intérieur nul, le diamètre intérieur est égal au diamètre d'ouverture, comme le montre la Figure 3 - 2. L'angle de coupe (Figure 3 - 3) doit être minimisé afin que les changements de volume lors de l'insertion du tube se produisent vers l'extérieur et non vers l'intérieur du tube. La Figure 3 - 4 présente la relation entre les déformations axiales par rapport à la localisation d'un élément de sol par rapport à un tube d'échantillonnage idéalisé. Comme le montre la figure, il est préférable d'avoir un rapport B/t le plus élevé possible afin de minimiser ces déformations. Ici, le paramètre B correspond au diamètre extérieur (D<sub>w</sub>) et le paramètre t est l'épaisseur de la paroi du tube. Pour les tubes utilisés dans cette étude, B/t et A<sub>r</sub> sont respectivement de 41 et 10,5 pour le tube mince et de 21 et 22,1 pour le tube épais, l'angle  $\alpha$  est de 6° et il n'y a pas de dégagement intérieur. En fait, le rapport de surface est directement relié au rapport B/t, où pour un B/t de 40, le rapport de surface est de 11 % (Hight, 1993).

Afin de pouvoir utiliser des tubes de cette dimension, un tubage de calibre SW (diamètre interne de 154 mm) est utilisé pour se rendre à la prodondeur désirée. De plus, pour sa mise en œuvre, il est bien important de nettoyer le trou de forage jusqu'à la profondeur d'échantillonnage, afin d'éviter que la première partie récupérée par le tube soit du sol remanié. Pour se faire, on utilise un tricône de 130,17 mm de diamètre afin de nettoyer le forage. Dans notre cas, il a fallu modifier ce tricône, neuf au début des travaux, en lui ajoutant environ 6.35 mm de soudure sur chaque « cône » afin d'augmenter son diamètre qui n'était pas suffisant pour bien nettover le forage. Cette opération a été réalisée par un machiniste se situant tout près du site d'étude et a permis d'améliorer l'efficacité du lavage et de réduire la quantité de matériau remanié récupéré dans le tube. Il est bien important, afin de ne pas générer trop de déformations dans l'échantillon, de foncer le tube en une seule poussée. Ensuite, un temps de 15 minutes est laissé avant de remonter le tube, ceci pour permettre au sol de bien adhérer aux parois du tube. Afin d'éliminer la succion, de l'eau est injectée dans le forage lors du retrait du tube. Une fois le tube récupéré, il est placé sur la table de travail afin de compléter l'opération. Du matériau (environ 1 à 2 cm) doit être enlevé du bout inférieur afin de pouvoir placer un bouchon d'étanchéité. La partie supérieure du tube est aussi travaillée afin d'éliminer le matériau remanié s'étant accumulé au fond du forage avant la pénétration du tube. Par la suite, un bouchon d'étanchéité est placé. Comme le nombre de bouchons d'étanchéité de ce format n'était pas suffisant pour les 11 tubes récupérés, un mélange de paraffine et vaseline a aussi été utilisé.

#### 3.1.4 Piézocône

La compagnie LVM, bureau de Québec, a été mandatée par le MTMDET pour réaliser les essais au piézocône et au piézocône sismique. Le bureau de Québec de LVM fait affaire la plupart du temps avec la compagnie Forages Comeau Inc. pour la réalisation des essais au piézocône, ce qui donne une bonne coordination et un bon travail d'équipe, ce qui a aussi été fait dans le présent projet. L'équipement pour les essais au piézocône (sondes, boîtier d'acquisition, câbles, logiciel, etc.) provient de la compagnie Vertek, située au Vermont. Des sondes de 5 tonnes et de 10 tonnes ont été utilisées lors des essais. La pointe des sondes possède une aire de 10 cm<sup>2</sup> et les tiges de piézocônes ont une aire de 15 cm<sup>2</sup>. La sonde a une longueur de 46,8 cm et chaque tige fait 1 m de

longueur. Au total, deux réducteurs de frottement ont été utilisés afin de minimiser le frottement qui est très important dans l'unité supérieure argileuse. Ces réducteurs de frottement utilisés sont de deux types : en beigne (48 mm) et en croix (68 mm). Un certain frottement supplémentaire a pu s'être développé durant l'essai par la différence d'aire entre la pointe (10 cm<sup>2</sup>) et les tiges (15 cm<sup>2</sup>). De plus, la calibration des sondes de piézocône avait été réalisée peu de temps avant la réalisation de ces essais.

Un avant-trou doit être réalisé afin d'arriver au niveau de l'unité de sol cohérent. Par la suite, le centre de la foreuse (au niveau du bâti de poussée) doit être bien enligné avec le trou de forage. Ce bâti est nécessaire afin de permettre la réalisation d'essais au piézocône dans l'unité supérieure de consistance très raide. Afin d'augmenter la capacité de poussée, une ou deux tarières de 25,4 cm de diamètre ont été utilisées afin d'ancrer la foreuse dans le sol.

La préparation de l'essai nécessite plusieurs étapes. Tout d'abord, la pierre poreuse, pré-saturée dans le silicone, doit être installée sur la sonde. Cette opération doit être réalisée dans la glycérine afin de s'assurer qu'il n'y a pas d'air dans le montage. Par la suite, les capteurs de la sonde sont vérifiés, en appuyant sur la pointe pour le capteur de pression, et en vérifiant le manchon pour les mesures de frottement. Le zéro de la sonde est établi avant d'entamer l'essai. La température de la sonde se stabilise dans l'eau à une température entre 5°C et 13°C pour une période d'environ 15 minutes. Il s'agit d'obtenir une température qui se rapproche de celle du sol. Le zéro est établi de nouveau à la fin de l'essai pour vérifier si la valeur obtenue est sensiblement la même qu'avant l'essai. Cela permet ainsi de juger de la qualité des essais en fonction des variations de valeurs des paramètres q<sub>c</sub> et u avant et après un essai. Les détails sur le zéro sont inscrits dans le compte-rendu de chaque essai au piézocône (Annexes A4 et B3). Durant le temps entre la fin de la préparation de la sonde et le début de l'essai, celle-ci est plongée dans un bac d'eau afin d'éviter la désaturation de la pierre poreuse. Une fois la foreuse bien enlignée, la première tige avec la sonde est placée et l'essai est commencé. La sonde est foncée à une vitesse de 1 cm/s, donc la poussée d'une tige de piézocône prend approximativement 1,5 minute. Un encodeur à fil est utilisé pour obtenir précisément la profondeur. Le boîtier d'acquisition, qui est relié à la sonde et à l'ordinateur, permet de recueillir les données en temps réel et ces données sont observées via le logiciel de la compagnie Vertek Inc. L'incrément de mesure est de 10 mm (1 cm). La compagnie LVM utilise une résolution de profondeur (depth resolution) de 1 donnée par 5 mm, et donc pour chaque incrément de 10 mm, la valeur retenue correspond à la moyenne des deux valeurs obtenues. Suite à la poussée d'une tige, le bâti de poussée est arrêté, tout comme le logiciel d'acquisition, puis une nouvelle tige est placée. Le tout est redémarré et l'essai se poursuit jusqu'à l'obtention du refus (sur roc ou till) ou de la profondeur désirée.

Les profils s'affichent à l'écran au fur et à mesure que l'essai est conduit. Ces profils sont ceux de la résistance en pointe  $q_c$ , de la pression interstitielle générée u à l'arrière du cône, et du frottement  $f_s$ . La résistance en pointe  $q_c$  doit être corrigée pour la pression d'eau agissant à l'arrière de la pointe afin d'obtenir la résistance en pointe corrigée  $q_t$ .

La résistance au cisaillement non drainé (S<sub>u</sub>) et la pression de préconsolidation de l'argile ( $\sigma'_p$ ) peuvent être déduits des essais au piézocône en utilisant la résistance nette ( $q_t$ - $\sigma_{v0}$ ) et les paramètres N<sub>kT</sub> et N<sub> $\sigma$ T</sub> respectivement. En général, le paramètre N<sub>kT</sub> varie entre 9 et 19 pour les sols argileux. Toutefois, les valeurs de N<sub>kT</sub> varient entre principalement entre 11 et 16 pour les argiles de la mer de Champlain. Pour ce qui est de N<sub> $\sigma$ T</sub>, il peut varier entre 3,3 et 3,8, mais la valeur de 3,4 est généralement utilisée pour les argiles de la mer de Champlain (Demers et Leroueil, 2002). En connaissant les conditions de pression interstitielle du terrain, il est également possible d'obtenir le paramètre B<sub>q</sub>, qui est le rapport de l'excédant de pression interstitielle (u-u<sub>0</sub>) sur la résistance en pointe nette ( $q_t$ - $\sigma_{v0}$ ).

Les sondes utilisées pour la réalisation du levé sismique ne contiennent qu'un seul géophone. Les ondes sont générées dans les deux axes pour pallier au fait de n'avoir qu'un géophone. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol (V<sub>s</sub>) est obtenue en déterminant la différence de vitesse entre deux levés à deux profondeurs consécutives. Elle peut également être estimée indirectement à partir des données du piézocône en utilisant les relations établies par Robertson (2012), Andrus (2007) ou Mayne (2007). Ces relations utilisent les résulats de résistance en pointe corrigée (q<sub>t</sub>) ou de frottement (f<sub>s</sub>). Les équations suivantes présentent le calcul de V<sub>s</sub> selon ces trois méthodes :

Robertson (2012), V<sub>s</sub> = 
$$\left(\alpha_{vs} * \left(\frac{q_t - \sigma_v}{p_a}\right)\right)^{0.5}$$

Andrus (2007),  $V_s = 2.62 * (q_t^{0.395}) * (I_c^{0.912}) * (\text{prof}^{0.124}) * 1.15$ 

Mayne (2007),  $V_s = 118.8 * \log(f_s) + 18.5$ 

où :

pa = Pression atmosphérique (101,3 kPa)

 $\alpha_{vs} = 10^{0.55*lc+1.68}$ 

 $l_{c} = \left( \left( 3.47 - \log(Q_{t1}) \right)^{2} + \left( \log(F_{r}) + 1.22 \right)^{2} \right)^{0.5}; \text{ l'indice de comportement du sol (Robertson & Wride, 1998)}$ 

$$Q_{t1} = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma'_v}$$
$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} * 100$$

### 3.1.5 Paraffinage et transport des échantillons

Afin de sceller les échantillons provenant du surcarottage, la méthode de paraffinage décrite par La Rochelle et al. (1986) a été utilisée directement sur le terrain. Un mélange de paraffine industrielle et de gelée de pétrole (« Vaseline ») à environ 45%/55% est fondu dans une mijoteuse à une température entre 60 et 65 °C. Sur le terrain, la température a été augmentée pour favoriser la fonte du mélange qui avait tendance à se solidifier rapidement dans la mijoteuse. Le paraffinage à l'extérieur faisait en sorte que les hydrocarbures volatiles pouvant se dégager du mélange chauffé à plus de 70 °C n'était pas problématique. Une planche de bois est paraffinée, puis une pellicule plastique est placée sur celle-ci et également paraffinée. Cette planche constitue la base de travail. La méthode utilisée sur le terrain n'est pas exactement la même que celle décrite par La Rochelle et al. (1986), car les vents présents ne permettaient pas le trempage de la pellicule plastique dans la paraffine avant de l'appliquer sur l'échantillon. La procédure utilisée est la suivante : tout d'abord, la carotte de sol est trempée directement dans le mélange à deux reprises, puis deux couches de pellicule plastique sont appliquées sur la carotte avec application d'une couche de mélange à chaque fois. Il est important d'enlever les bulles d'air pouvant se former entre la carotte et la pellicule plastique. Chaque échantillon est finalement identifié et entouré de papier bulle, ou styromousse, pour être ensuite placé dans un contenant ou boîte de styromousse ou de plastique. Les échantillons sont protégés et sont placés à l'ombre pour éviter le soleil.

Pour les échantillons prélevés au site de Notre-Dame-des-Neiges, l'utilisation d'un véhicule amphibie (Argo Conquest) a permis de transporter les échantillons du site jusqu'aux voitures, en suivant un chemin de VTT sur quelques centaines de mètres.

## 3.1.6 Essai de pénétration standard

L'essai de pénétration standard (SPT) permet d'obtenir un profil d'indices N. Cet indice peut être corrigé ( $N_{60}$ ) en fonction de différents facteurs de correction, selon l'équation suivante :

$$(N)_{60} = N_m C_E C_R C_B C_S$$

Où N<sub>m</sub> est l'indice N brut mesuré durant l'essai. L'utilisation d'un analyseur de battage (SPT analyzer) permet d'obtenir, entre autres, le pourcentage d'énergie transmise au train de tiges lors de la frappe du marteau hydraulique. L'indice N doit être corrigé pour une énergie transmise de 60 %, via le facteur de correction C<sub>E</sub>, qui est donné par l'équation suivante :

$$C_E = \frac{ER}{60\%}$$

Où ER correspond à l'énergie transmise lors de l'essai. Le facteur de correction  $C_R$  tient compte de la longueur des tiges de forage utilisées à la profondeur de l'essai SPT et varie entre 0,75 et 1,00 selon le train de tiges. Le facteur de correction  $C_B$  est une correction à apporter si le trou de forage est d'une dimension non-standard et le facteur de correction  $C_S$  tient compte du type de cuillère fendue utilisée (avec ou sans membrane interne). Dans ce cas-ci, le trou de forage est de

dimension standard et C<sub>B</sub> prend une valeur de 1,00, tandis que la cuillère fendue utilisée ne possède pas de membrane interne et donc, C<sub>S</sub> prend une valeur de 1,20.

L'essai SPT est combiné à la récupération d'échantillons de sol remanié à l'aide d'une cuillère fendue, qui est enfoncée dans le sol par la chute du marteau hydraulique d'une hauteur de 76,2 cm. La cuillère fendue est de calibre B (50,8 mm de diamètre extérieur, 34,925 mm de diamètre d'ouverture), sans membrane intérieure et a une longueur de 61 cm. La description et la récupération des échantillons de sol ont été effectuées par le technicien de LVM mandaté pour le projet. L'essai SPT a été réalisé tout d'abord en continu, puis par la suite au 152,4 cm jusqu'au refus au roc. L'analyseur de battage n'a toutefois été utilisé qu'au site de Notre-Dame-des-Neiges au forage FZ-05, et non au site de l'Isle-Verte.

### 3.1.7 Essai pressiométrique

L'essai pressiométrique a été utilisé seulement lors de la campagne de 2006 pour le site de l'Isle-Verte par le MTMDET. Le pressiomètre utilisé est de type Ménard, qui demande un pré-trou pour l'insertion de la sonde, il ne s'agit donc pas d'un pressiomètre autoforeur. Le fonctionnement de l'appareil ne sera pas revu ici, mais seulement les points généraux les plus importants, notamment en ce qui a trait au traitement des données. Les deux paramètres qui sont obtenus à partir de l'essai pressiométrique sont la pression limite (P<sub>L</sub>) et le module pressiométrique (E<sub>M</sub>). La pression limite n'est pas influencée par le remaniement du trou de forage. Par contre, le module pressiométrique est très sensible à la technique de mise en place et sa valeur diminuera énormément si le remaniement du sol est important lors du forage. De ce fait, les valeurs de pression limite possèdent généralement une bonne répétabilité, contrairement aux valeurs de module pressiométrique. L'allure des courbes contrainte-déformation obtenues permet de juger de la qualité du test.

Il est possible de relier la pression limite à la résistance au cisaillement non drainé du sol par l'équation suivante :

$$S_{uPM} = \frac{P_L - \sigma_{ho}}{\beta}$$

où  $\sigma_{ho}$  est la contrainte totale horizontale du sol au repos et  $\beta$  est un coefficient théorique qui varie approximativement entre 6,5 et 12 (Baguelin, 1978). Il est toutefois difficile d'obtenir une valeur fiable de  $\sigma_{ho}$  à partir de l'essai pressiométrique de type Ménard, le pressiomètre autoforeur étant plus adapté pour cela. Il est alors plus simple d'utiliser l'équation suivante :

$$S_{uPM} = \frac{P_L - \sigma_{vo}}{\beta'}$$

où  $\sigma_{vo}$  est la contrainte totale verticale du sol. Si des valeurs de résistance au cisaillement non drainé à partir d'un scissomètre de chantier sont disponibles, il est alors possible de déterminer la valeur de  $\beta$ ' pour le sol étudié.

## 3.1.8 Piézométrie

Afin de bien installer un piézomètre de type Casagrande, il faut s'assurer de respecter les étapes de mise en place. Tout d'abord, du gravier net est placé au fond du forage jusqu'à atteindre 75 cm sous le niveau d'installation de la base du piézomètre. Un premier bouchon de bentonite de 60 cm est mis en place, suivi d'une couche de 15 cm de sable de silice. Ensuite, le piézomètre est descendu dans le trou de forage et du sable de silice est versé afin d'entourer la crépine du piézomètre. Au total, la couche de sable fait 75 cm. Finalement, on complète l'installation en plaçant un deuxième bouchon de bentonite de 60 cm. Le sable entourant la crépine est perméable et les deux bouchons de bentonite isolent la zone où l'on veut mesurer la pression interstitielle. La longueur de la crépine du piézomètre est de 45 cm. Le reste du trou de forage est rempli avec du tout-venant et le piézomètre est identifié au niveau du sol. Le niveau d'eau est déterminé à partir d'une sonde piézométrique manuelle.

## 3.1.9 Entreposage des échantillons

Pendant les travaux effectués durant les jours de semaine, les échantillons étaient entreposés dans la chambre d'hôtel afin de s'assurer que la température ne soit pas trop élevée. À la fin de la semaine de travail, les échantillons et les tubes étaient transportés dans la chambre froide du département de Géologie et Génie Géologique de l'Université Laval. La chambre froide est réglée à une température de 4°C et à un taux d'humidité d'approximativement 100%. La plupart des tubes ont été placés en position verticale, à moins que ce ne soit pas possible à cause du bouchon d'étanchéité sur la partie inférieure qui l'en empêchait. Les conditions d'entreposage décrites cihaut ont été effectives pendant les deux premiers mois. Par la suite, les bouchons ont tous été enlevés puisque le MTMDET en avait besoin dans une autre campagne d'échantillonnage (14 et 15 septembre 2014). À partir de ce moment, les extrémités de tous les tubes ont été paraffinées et les tubes entreposés à la verticale dans la même chambre froide.

Lors de la journée du vendredi 30 janvier 2015, chaque tube a été sorti de la chambre froide de l'Université Laval pour un total de 4 heures, pour la réalisation de la tomodensitométrie. Ce temps comprend le transport vers le laboratoire de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), la durée des essais et le retour vers l'Université Laval. Le transport s'est effectué en voiture. Les tubes ont été placés sur un matelas de mousse d'environ 8 cm d'épaisseur et entourés de papier-bulle pour éviter les chocs.

Finalement, les échantillons et les tubes ont été transférés dans la nouvelle chambre froide du Laboratoire de géotechnique de l'Université Laval, où la température varie entre 7°C et 9°C avec un taux d'humidité voisin de 100 %.

# 3.2 Méthodologie des travaux de laboratoire

Cette section décrit la méthodologie employée pour chacun des essais effectués en laboratoire dans le cade de ce projet de recherche. La consistance très raide des sols testés fait en sorte qu'il est impossible de déterminer les résistances intacte et remaniée au cône suédois. La pénétration de cône de 400 g est trop faible (de l'ordre de 2-3 mm) et la relation déterminée par Houston & Mitchell (1969), reliant la résistance au cisaillement remaniée et l'indice de liquidité, est imprécise et perd de sa signification. Cet essai n'a donc pas été retenu.

## 3.2.1 Essais de caractérisation physique

## 3.2.1.1 Essais de base

Plusieurs teneurs en eau ont été mesurées lors de la réalisation des travaux de laboratoire. Les premières ont été récupérées sur les carottes venant d'être directement extraites du sol. Par la suite, des teneurs en eau ont été récupérées lors du détubage, des essais de caractérisation de base ainsi que des essais de caractérisation mécanique (essais oedométriques et essais triaxiaux). Ces teneurs en eau ont été faits à partir de la norme ASTM D2216-10, à l'exception des échantillons récupérés directement lors de l'extraction, car ceux-ci ont une masse entre 10 et 20 grammes dû à la dimension des fioles utilisées.

Les limites d'Atterberg, limite de plasticité et limite de liquidité, ont été déterminées à partir de la norme BNQ 2501-092. La limite de liquidité est obtenue par la méthode du pénétromètre à cône suédois. Lors de la détermination des limites de liquidité, la salinité des échantillons était encore inconnue. L'utilisation d'eau distillée afin de remanier le sol a été préconisée, tel qu'inscrit dans la norme BNQ, et ce même si les effets de la salinité sur la détermination de la limite de liquidité sont importants.

## 3.2.1.2 Sédimentométrie

Les quelques essais granulométriques par sédimentation sont effectués sur la fraction fine de certains échantillons en suivant la norme BNQ-2501-025 sur l'analyse granulométrique des sols inorganiques. Ces échantillons n'ont pas été séchés préalablement.

## 3.2.1.3 Salinité

La mesure de la conductivité électrique de l'eau contenue dans le sol a permis d'obtenir la salinité pour des échantillons provenant des différentes unités des deux sites d'étude. Les tests ont été effectués à l'Université Laval. Le sol est placé dans un montage qui permet d'extraire l'eau par l'application d'une pression d'air. L'eau récupérée est recueillie dans une éprouvette pour déterminer la conductivité électrique. Afin d'obtenir la concentration en sels du sol, un étalonnage doit être effectué avec des concentrations en sels précises. Dans ce cas précis, la conductivité électrique a été mesurée pour différentes concentrations qui sont présentées avec la relation linéaire montrée à la Figure 3 - 5. Donc, la conductivité électrique peut être mesurée pour l'eau obtenue des différents échantillons, et avec l'aide de l'équation de la droite, il est possible

d'estimer la salinité. L'appareil de mesure de conductance utilisé est un YSI model 32. Trois lectures sont effectuées, et la moyenne de ces lectures est conservée.

#### 3.2.1.4 Tomodensitométrie (CT-SCAN)

La technologie de tomodensitométrie (CT SCAN) a été utilisée avant le détubage des tubes afin de connaître précisément la stratigraphie des échantillons, la distribution et l'emplacement d'éventuels graviers et cailloux contenus dans ces derniers. Cette étape permet aussi une découpe des échantillons la plus efficace possible. Il s'agit d'une technique d'imagerie qui permet de mesurer l'absorption des rayons X par l'objet, dans ce cas-ci un tube d'acier contenant du sol argileux, et d'obtenir une image de ce dernier suite à un traitement informatique. Il s'agit en fait d'une mesure non destructive de la variation de la densité des matériaux qui sont analysés.

L'échantillon est analysé selon 3 plans, soit : sagittal, coronal et axial (Figure 3 - 6). Dans notre cas, un total de 11 tubes ont été analysés, dont 5 d'entre eux sont composés d'acier dont les parois sont de 6,35 mm. Les 6 autres tubes sont composés d'acier inoxydable, avec une épaisseur de paroi de 3,1 mm. Pour ce qui est des tubes épais, dont les parois sont de 6,35 mm, les images obtenues sont moins nettes dû à l'importante épaisseur de la paroi d'acier. Les réglages de puissance de l'appareil Siemens étaient au maximum permis pour les réglages de l'INRS.

L'analyse des images est effectuée grâce au logiciel Fiji ImageJ, disponible gratuitement sur Internet. Ce logiciel permet de visualiser et de travailler les images en format DICOM. Il est également possible d'avoir les profils de variation de la densité dans un même échantillon et de visualiser l'échantillon selon les 3 axes en même temps. Cette caractéristique permet d'avoir une image de la stratigraphie des échantillons et de cibler précisément les parties des échantillons qui seront utilisées dans les divers essais de caractérisation et éviter les zones où la présence de gravier serait problématique pour la découpe en échantillons, ou encore les zones de sol remanié. Pour ce qui est des profils de densité, ils sont présentés selon l'échelle UH (Hounsfield) qui correspond à une transformation linéaire de la mesure du coefficient d'absorption original où l'eau distillée possède une valeur de 0 UH et l'air une valeur de -1 000 UH (Hounsfield, 1980). Il s'agit d'une échelle quantitative de radiodensité généralement utilisée dans le domaine de la tomodensitométrie médicale pour définir les densités des différentes matières humaines. Il est à noter que les valeurs obtenues ne correspondent pas directement aux valeurs de densité du sol analysé, étant donné que le matériau du tube mince influence grandement les valeurs de densité.

Deux séries de tomodensitométrie ont été effectuées, la première avec le sol toujours présent dans les tubes, et la deuxième avec le sol sous forme de carottes suite à l'extraction à partir des tubes. Comme la résolution n'était pas optimale due à l'épaisseur d'acier des tubes utilisés, des images ont été refaites en utilisant les échantillons paraffinés afin d'augmenter la résolution. Toutefois, la netteté de l'image ne s'est pas avérée meilleure avec l'échantillon paraffiné par rapport à l'échantillon contenu dans le tube d'acier.

## 3.2.2 Essais de caractérisation minéralogique/géologique

Cette section présente les méthodologies des différents essais de caractérisation minéralogique qui ont été effectués pour ce projet. Sauf exception, ceux-ci ont été réalisés par Jean Frenette et Martin Plante, du département de Géologie et Génie Géologique de l'Université Laval.

#### 3.2.2.1 Datation

La datation au carbone 14 a été réalisée conjointement par le Laboratoire de Radiochronologie de l'Université Laval (Centre d'études nordiques) et le « Center for applied isotope studies » de l'Université de Géorgie, aux États-Unis. Un prétraitement (leaching) a été effectué par le laboratoire du CEN, puis l'échantillon a été envoyé au « Center for applied isotope studies » pour la datation selon la méthode par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS). Les résultats sont donnés en âge radiocarbone avant 1950 (âge BP), en utilisant la demi-vie du <sup>14</sup>C de 5 568 ans.

## 3.2.2.2 Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse qualitative utilisant le rayonnement X afin de déterminer les distances entre les différents plans atomiques composant les minéraux. Elle permet donc l'identification des différentes phases minéralogiques d'un échantillon (Klug & Alexander, 1954).

Quatre analyses par échantillon sont effectuées. D'abord, une analyse sur la partie fine de l'échantillon (<2  $\mu$ m  $\rightarrow$  lame orientée nature-glycérolée-chauffée) est réalisée afin d'identifier les minéraux argileux et ensuite, une analyse totale (sur poudre) est effectuée pour l'identification des autres phases minéralogiques.

Dans le cas de l'analyse totale, il s'agit d'une analyse standard sur poudre. Pour se faire, une petite quantité de sol est séchée préalablement à l'air libre, car le séchage à l'étuve pourrait modifier la nature des minéraux argileux. Par la suite, une étape de broyage est nécessaire afin d'homogénéiser la granulométrie de l'échantillon et de s'assurer qu'il n'y ait pas de particules trop grossières. Le sol est ensuite placé sur un porte-échantillon de manière à ne pas créer d'orientation préférentielle des minéraux. L'échantillon est ensuite inséré dans l'appareil pour l'analyse.

Dans le cas de l'analyse des minéraux argileux, la fraction argileuse (<2 µm) doit être séparée du reste du sol par une technique de centrifugation. Une fois la séparation effectuée, la fraction fine est récupérée et doit être appliquée sur une lamelle de verre dépoli afin de créer une mince couche et ainsi favoriser l'orientation préférentielle des minéraux argileux. L'identification de ces minéraux, dont la structure est en feuillets, implique d'obtenir de l'information quant aux distances interréticulaires selon un plan horizontal. Une fois la préparation des lamelles terminée, la première analyse peut être lancée. Par la suite, afin de bien identifier les différentes phases argileuses, il est nécessaire de faire certains traitements aux lamelles d'argile. Premièrement, l'ajout de glycérol (10%) sur les lamelles permet de faire une analyse qui met en évidence les minéraux argileux

gonflants. Deuxièmement, une analyse suite à un chauffage des lamelles à 550 °C dans un four Linberg, pendant une heure, permet de faire ressortir les minéraux argileux sensibles à la chaleur. Les lamelles sont refroidies à l'air libre, puis les analyses peuvent être lancées.

### Conditions expérimentales

Diffractomètre Siemens D5000  $\rightarrow$  courant de 30 mA et tension de 40 kV Anode Cu<sub>Ka</sub> = 1,54059Å Balayage à taux constant 1°/min  $\rightarrow$  0,020°/1,2 s Balayage pour les analyses totales sur poudre  $\rightarrow$ 2-65° Balayage pour les analyses pour la phase argileuse des deux échantillons :

- Lamelle orientée nature : 2-40°
- Lamelle orientée glycérolée : 2-32°
- Lamelle orientée chauffée: 2-32°

Dans le cas de l'analyse totale sur poudre, le balayage est plus grand afin de pouvoir déterminer les différentes phases minéralogiques dont les distances interréticulaires sont plus petites que les minéraux argileux.

Centrifugation à basse vitesse

Centrifugeuse: IEC International Centrifuge Model MAK – 115 volts – 5,5 ampères 750 tours/minute durant 3 minutes 30 secondes

#### Centrifugation à haute vitesse

Centrifugeuse: IEC International Centrifuge Model HT – 115 volts A.C. – 60 cycles – 12 ampères 10 000 tours/minute durant 5 minutes

#### 3.2.2.3 Porosimétrie au mercure

L'essai de porosimétrie au mercure permet de déterminer les différentes familles de pores d'un échantillon, par l'intrusion de mercure, un liquide non-mouillant, en fonction de la pression appliquée. Plus l'ouverture vers le pore est petite et plus la pression à appliquer doit être élevée, celle-ci pouvant atteindre 414 MPa au dernier stade de l'essai. En fait, l'essai permet seulement de déterminer l'ouverture des pores et non la dimension des pores en tant que telle. L'équation de Washburn permet d'obtenir le diamètre d'ouverture des pores, mais doit supposer que la géométrie de ceux-ci est cylindrique. Il s'agit donc du produit de la pression appliquée et de l'aire totale, qui est égal à la force externe totale appliquée au mercure. Afin de maintenir l'équilibre, il y a une force résistante qui correspond au produit du cosinus de l'angle de contact du mercure avec l'échantillon et la tension de surface du mercure. L'équation simplifiée de Washburn pour obtenir le diamètre d'ouverture des pores simplifiée de Washburn pour obtenir le diamètre d'ouverture des pores de l'angle de contact du mercure avec l'échantillon et la tension de surface du mercure. L'équation simplifiée de Washburn pour obtenir le diamètre d'ouverture des pores est la suivante :

$$D = \frac{-4\gamma\cos(\theta)}{P}.$$

Où,

D = Diamètre d'ouverture du pore

 $\gamma$  = Tension de surface du mercure (0,485 N/m à 25°C)

 $\theta$  = Angle de contact (130°)

P = Pression d'entrée du mercure

Compte tenu des suppositions, les résultats de cette méthode sont arbitraires, mais permet d'obtenir une bonne idée de la distribution des pores dans les sols étudiés. Dans ce cas-ci, l'essai permet de comparer entre eux les différents sols étudiés, et de les comparer également aux argiles de l'est du Canada, pour qui divers essais ont déjà été effectués par le passé, notamment par Delage & Lefebvre (1984) et Lapierre et al. (1990). La pression appliquée au mercure et le volume d'intrusion de mercure sont les deux paramètres les plus importants afin d'obtenir les résultats les plus précis (Giesche, 2006).

L'essai de porosimétrie au mercure et l'analyse au microscope électronique à balayage ont été réalisés sur du sol provenant des mêmes échantillons, afin de pouvoir corréler les résultats des deux essais entre eux. Les échantillons doivent être préparés selon une méthodologie particulière. De petits batônnets d'argile sont découpés perpendiculairement au sens de déposition. Puis, ces batônnets sont plongés dans l'azote liquide afin que le gel soit instantané et que l'eau contenue dans le sol ne prenne pas d'expansion. Ces batônnets sont alors cassés en petits morceaux afin d'exposer une cassure fraîche. Il faut ensuite procéder à la sublimation sous-vide du sol gelé, afin d'éviter un quelquonque changement de volume de l'eau contenu à l'intérieur de l'échantillon. Une variation de volume de cette eau entraîne une modification de la structure interne de l'argile, et donc un remaniement non voulu. Il s'agit donc d'extraire l'eau contenu dans le sol sans lui induire de déformations. Finalement, le sol est placé dans une boîte de pétri qui repose dans un dessicateur jusqu'au moment de l'essai. L'appareil utilisé à l'Université Laval est un Micromeritics AutoPore IV. Un échantillon de l'unité supérieure et un de l'unité inférieure sont analysés pour chacun des deux sites.

#### 3.2.2.4 Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la structure interne d'un échantillon de sol argileux par l'analyse de sa surface suite à des intéractions électrons-matière. Des images à haute résolution peuvent ainsi être obtenues. L'appareil utilisé à l'Université Laval est un JEOL JSM-840A. L'échantillon doit être préparé de la même façon que pour la porosimétrie au mercure, afin d'être en mesure d'observer la structure interne du sol considéré comme « non remanié ». La face observée est donc perpendiculaire au sens de déposition du sol. Les échantillons à analyser

doivent être recouverts d'un mélange or-palladium afin de les rendre conducteurs et de permettre les intéractions électrons-matière. Les images sont obtenues à partir des électrons secondaires collectées suite à l'impact entre la matière et le faisceau d'électrons primaires. Un échantillon de l'unité supérieure et un de l'unité inférieure sont analysés pour chacun des deux sites, les mêmes que pour l'essai de porosimétrie au mercure.

#### 3.2.2.5 Surface spécifique

La surface spécifique correspond à la surface totale (A<sub>s</sub>) par unité de masse (M) et se définit par l'équation suivante :

$$S_s = \frac{A_s}{M}$$

qui s'exprime en  $\frac{m^2}{g}$ . Elle est liée à la quantité et au type d'argile, à la minéralogie des argiles, à la teneur en eau, à la capacité d'échange cationique, à la limite de liquidité ainsi qu'à l'angle de

frottement interne des sols (Cuillé, 1976).

Cette propriété peut être déterminée par l'essai au bleu de méthylène, qui permet de déterminer la capacité d'adsorption ionique d'un échantillon de sol en mesurant la quantité de bleu de méthylène nécessaire afin de recouvrir la surface totale de toutes les particules argileuses du sol (Cuillé, 1976). Ceci est possible par les échanges ioniques entre les cations d'argile qui sont plus facilement échangeables et les cations du bleu de méthylène en solution. Les échanges sont favorisés en fonction des cations disponibles et donc, du type de minerai argileux.

Afin de déterminer la quantité de bleu de méthylène adsorbé, l'utilisation du spectrophotomètre UV est privilégiée face à la méthode traditionnelle aux gouttes. Le spectrophotomètre UV permet en effet d'obtenir une valeur plus précise de la quantité de bleu de méthylène utilisée, et surtout moins dépendante de l'opérateur. Cette valeur est obtenue par la lecture du point d'inflexion sur le graphique du pourcentage de transmittance en fonction de la quantité de bleu de méthylène adsorbés par l'échantillon de sol. Le degré de précision pour la balance électronique est de  $\pm$  0,0001 g et est de 0,1 ml pour la burette pour le bleu de méthylène. Le degré de précision pour le spectrophotomètre est égal à la moitié de la plus petite division. L'erreur absolue de la transmittance est de 0,5 %.

#### Conditions expérimentales

Le spectrophotomètre UV utilisé est le *Spectronic 20 Bausch & Lomb* qui a été préalablement calibré avec une éprouvette d'eau distillée au début de chacun des essais. La longueur d'onde de l'appareil est de 665 nm. La concentration de la solution de bleu de méthylène est de 1,0075 g/litre.
#### 3.2.2.6 Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique d'un sol est la mesure de la quantité de sites chargés négativement pouvant retenir des cations (chargés positivement) par des forces électrostatiques (Ross & Ketterings, 2011). Les principaux cations sont le Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> ou encore le K<sup>+</sup>, et ils sont facilement échangeables avec d'autres cations. La capacité d'échange cationique est également fonction de la surface spécifique des minéraux.

Les minéraux argileux possèdent généralement une capacité d'échange cationique assez importante, en fonction du type d'argile, car les particules d'argiles chargées négativement floculent en présence de sels (chargés positivement) tels que Ca<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, etc. Les smectites, dont la surface spécifique est la plus élevée, possèdent généralement les valeurs de capacité d'échange cationique les plus élevées.

L'essai nécessite plusieurs étapes de lavage au NH<sub>4</sub>Cl et à l'isopropanol et un titrage final permettant d'obtenir une quantitié de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> qui est transformé en capacité d'échange cationique par calcul.

#### 3.2.2.7 Pourcentage de carbonates total (Analyse thermogravimétrique)

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de déterminer l'eau de consitution et le pourcentage de carbonates total des échantillons de sol analysés en utilisant une méthode thermique. L'essai mesure en continu la perte de masse d'un échantillon en fonction de la température. L'échantillon est placé dans un four auquel est imposé un taux de chauffe constant. Ces pertes de masse observées durant l'essai sont associées à la perte d'eau dans l'échantillon. Selon St-Gelais (1990), la réaction de l'eau dans les micropores se produit entre 105 et 110°C, celle de l'eau interfoliaire entre 110 et 130°C et celle de l'eau de constitution entre 300 et 900 °C. La plage de température pour les pertes de masse des carbonates est entre 500 et 700°C. Afin de déterminer le pourcentage d'eau de constitution, il faut préalablement traiter l'échantillon de sol à l'acide chlorhydrique, car la plage de température des minéraux carbonatés se situe à l'intérieur de celle pour l'eau de constitution. Cette étape n'a pas été effectuée et donc, seul le pourcentage de carbonates total peut être indirectement déterminé par cette méthode. Il est alors possible de comparer ces valeurs avec les valeurs obtenues avec la méthode Chittick. La quantité de carbonates est obtenue par l'équation suivante :

mg carbonates = 
$$\left(\frac{X(mg) / \frac{1000mg}{g}}{44.01g / mol}\right) * 100.09g / mol * 1000mg / g$$

où X est la perte de masse entre 500 et 700 °C, en mg. La quantité de carbonates obtenue est rapportée en pourcentage en la divisant par la masse initiale de l'échantillon.

## 3.2.2.8 Pourcentage de carbonates total (Chittick)

La méthode Chittick (Dreimanis, 1962) est un essai qui permet de déterminer le pourcentage de carbonates total dans un sol, par une dissolution à l'acide chlorhydrique. Le pourcentage de calcite et de dolomite est déterminé, et l'addition des deux permet d'obtenir le pourcentage total de carbonates. Ces deux minéraux sont les deux principales phases carbonatées que l'on retrouve dans la nature. La précision de la méthode est de  $\pm$  0.3 %. Cette méthode est jugée acceptable pour la détermination des carbonates totaux (Locat & Bérubé, 1986).

Les échantillons de sol doivent être préalablement chauffés à l'étuve (114 °C) pendant 24 heures afin d'obtenir un sol sec. Ensuite, les échantillons séchés sont broyés afin d'obtenir une meilleure surface de contact entre les particules et l'acide chlorhydrique. Ceci est d'autant plus important que le volume de CO<sub>2</sub> produit par la dissolution de la calcite est mesuré après les premiers 30 secondes d'essai.

Il suffit de dissoudre une petite quantité de sol (environ 1,7 grammes) dont la granulométrie est inférieure à 75 µm, par une quantité d'acide chlorhydrique de concentration connue (20 ml à 20 %). L'essai se déroule en système clos (montage étanche) et le volume de gaz carbonique produit par la dissolution des carbonates est mesuré. Étant donné que la calcite et la dolomite ne se dissolvent pas à la même vitesse, il est possible de différencier les deux minéraux. La calcite se dissout complètement en approximativement 30 secondes après le début de la réaction, tandis que la dolomite prend beaucoup plus de temps. La lecture du volume de CO<sub>2</sub> pour la détermination de la dolomite se fait après 30 minutes.

## 3.2.3 Essais de caractérisation mécanique

Étant donné le nombre d'échantillons disponibles, il n'y a que des essais oedométriques et des essais triaxiaux qui ont été effectués sur les échantillons. Les détails du traitement de données appliqué à chaque essai sont disponibles dans les chiffriers Excel associés.

#### 3.2.3.1 Essais oedométriques

Les essais oedométriques ont été réalisés en suivant la norme ASTM D2435/D2435M-11 en suivant la méthode A, ce qui fait que les coefficients de consolidation ne sont pas obtenus.

#### Préparation de l'échantillon

La découpe de l'échantillon nécessite un appareil de découpe et un anneau avec lequel l'échantillon sera installé dans la cellule oedométrique. L'échantillon a un diamètre approximatif de 50,5 mm et une hauteur d'environ 19,2 mm. La consistance des échantillons fait en sorte que l'utilisation d'un fil de fer n'est pas efficace, car il a tendance à comprimer l'échantillon et à le déformer. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un couteau à lame rétractable pour une première découpe et lorsque le diamètre final est presque atteint, le fil de fer peut être utilisé pour compléter la découpe. L'anneau de découpe permet de terminer la découpe de l'échantillon. La récupération de matériau durant la découpe permet de déterminer la teneur en eau de l'échantillon avant l'essai.

## Réalisation de l'essai

L'essai oedométrique est lancé et le premier palier de chargement est appliqué à l'échantillon. Chaque palier subséquent correspond à une augmentation de 50 % de la masse appliquée et est d'une durée de 24 heures. Des essais de perméabilité ont été réalisés sur quelques échantillons durant les essais oedométriques en chargement. La méthode est décrite à la section 3.2.4. La séquence de déchargement complète a été réalisée en prenant deux lectures par jour.

## Traitement des données

Les essais oedométriques sont représentés dans un graphique e – log  $\sigma'_v$ . Il faut dabord obtenir la charge exacte appliquée en kilopascals. Par la suite, les lectures du cadran sont transformées en variation de hauteur en mm. Les dimensions initiales ont été prises avant de commencer l'essai et donc le volume et la hauteur de l'échantillon sont connus. Comme l'échantillon est confiné dans l'anneau, il ne peut y avoir que des déformations axiales. Il est alors possible de déterminer la variation de volume à chaque palier, à partir des variations de hauteur. À partir des données disponibles, en considérant que l'échantillon est saturé, il est possible d'obtenir l'indice des vides naturel ainsi que les indices des vides associés à chaque palier de chargement. À partir du graphique de e – log  $\sigma'_v$ , la méthode de Casagrande est utilisée pour déterminer la pression de préconsolidation de l'échantillon ( $\sigma'_p$ ), ainsi que les indices de compression ( $c_c$ ) et de recompression ( $c_s$ ).

#### 3.2.3.2 Essais triaxiaux

La procédure provient d'un document réalisé à l'Université Laval pour la réalisation des essais triaxiaux. Ce document est basé sur la norme ASTM D4767-11. La totalité des essais triaxiaux effectués sur les échantillons sont de type CIU, soit un essai de cisaillement en condition non drainée sur un échantillon consolidé isotropiquement à la contrainte effective verticale en place  $(\sigma'_{v0})$ . Donc, les sols sont tous cisaillés dans le domaine surconsolidé.

#### Préparation de l'échantillon

La découpe de l'échantillon utilise le même montage, avec des bases dentées de dimension inférieure à celles utilisées pour l'essai oedométrique pour accomoder la dimension des échantillons. Dans ce cas-ci, les échantillons ont une dimension finale approximative de 70 mm de hauteur et de 38 mm de diamètre. La consistance des échantillons fait en sorte que l'utilisation d'un fil de fer n'est pas efficace, car il a tendance à comprimer l'échantillon et à le déformer. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un couteau à lame rétractable pour une première découpe et lorsque le diamètre final est presque atteint, le fil de fer peut être utilisé pour compléter la découpe. L'utilisation d'un gabarit permet d'obtenir l'échantillon final. La récupération de matériau durant la découpe permet de déterminer la teneur en eau de l'échantillon avant l'essai.

#### Installation de l'échantillon

Une membrane de caoutchouc est placée sur l'échantillon afin de l'isoler de l'eau utilisée pour appliquer la pression cellulaire. Cette membrane a une épaisseur de 0,305 mm et un diamètre de 38,1 mm, ce qui correspond à un diamètre pratiquement égal à celui de l'échantillon. Les pierres poreuses, les papiers filtres et l'échantillon sont placés dans la cellule, qui elle est ensuite fermée pour être remplie d'eau désaérée et d'huile de silicone. L'utilisation d'huile de silicone pour remplir la partie sommitale de la cellule est préconisée, afin d'éviter de trop grandes fuites et ainsi empêcher une perte de pression dans la cellule. Le potentiomètre (LVDT) est ensuite placé et permet de suivre l'évolution des déformations axiales sur l'échantillon.

## Réalisation de l'essai

Il y a d'abord une phase de saturation, pour s'assurer qu'il n'y a plus ou presque plus de bulles d'air pouvant fausser les pressions interstitielles. Ces bulles d'air piégées dans l'échantillon ou dans les pierres poreuses et papiers filtres seront remplacées par de l'eau désaérée. Suite à l'étape de saturation, l'échantillon est consolidé jusqu'à la contrainte prédéterminée. Finalement, lorsque cette contrainte est atteinte, le cisaillement en condition non drainé peut avoir lieu.

## Saturation

La Figure 3 - 7 présente la contrepression nécessaire pour l'atteinte d'un taux de saturation satisfaisant. Dans ce cas-ci, le taux de saturation visé est d'au moins 95 %. Plus la contre-pression est élevée et plus les bulles d'air peuvent se dissoudre dans l'eau. Une pression cellulaire ( $\sigma_3$ ) initiale de 10 kPa est d'abord appliquée à l'échantillon. Cette contrainte effective sera gardée tout au long de la période de saturation. Le paramètre permettant de s'assurer que le degré de saturation est suffisamment élevé est le paramètre *B* ( $\Delta u/\Delta \sigma_3$ ) qui correspond au rapport de l'augmentation de la pression interstitielle en réponse à l'augmentation de la pression cellulaire. Une fois le taux de saturation désiré atteint, les paliers de consolidation peuvent débuter.

## Consolidation

Une fois que la saturation est jugée suffisante, il faut consolider l'échantillon à l'état des contraintes désiré en conditions drainées. Dans notre cas, les contraintes isotropes visées sont la contrainte effective verticale  $\sigma'_{v0}$  pour chacun des échantillons. Tous les paliers sont de 30 kPa, exceptés pour quelques échantillons qui ont connus des palliers plus grands (entre 60 et 100 kPa) pour accélérer le processus.

## Cisaillement

Comme si s'agit d'essais de cisaillement en condition non drainée, le drainage doit être fermé avant de débuter le cisaillement. La vitesse de déformation est de 0,0061 mm/min, ce qui correspond à 0,5 %/heure. L'essai est automatisé et se poursuit jusqu'à l'atteinte d'environ 14 %

de déformation en approximativement 28 heures. Ceci correspond à une diminution d'environ 10 mm de la hauteur initiale de l'échantillon.

## Traitement des données

Tout ce qui a trait au traitement des données et aux différentes corrections à apporter pour l'essai triaxial se trouve à l'Annexe E.

## 3.2.4 Mesure de la conductivité hydraulique

Pendant la réalisation d'un essai oedométrique, il est possible d'effectuer des essais de perméabilité à différents niveaux de consolidation. Ceci permet d'obtenir une conductivité hydraulique à l'indice des vides à ce moment-là ainsi que la conductivité hydraulique à l'indice des vides naturel. Deux types d'essais peuvent être effectués, soit : à charge constante ou à charge variable. Pour l'essai à charge hydraulique constante, un montage avec une bouteille de Mariotte est nécessaire afin d'obtenir une charge hydraulique constante. Pour l'essai à charge hydraulique variable, un simple tube de verre avec graduations est nécessaire. Quatre essais de perméabilité par essai oedométrique sont généralement nécessaires pour obtenir une relation e – k complète, soit un essai dans le domaine surconsolidé et trois essais dans le domaine normalement consolidé.

Le calcul de la perméabilité n'est pas le même dans les deux cas. Pour l'essai à charge constante, l'équation suivante, utilisant la loi de Darcy, est utilisée :

$$k = \frac{Q^*L}{\Delta h^* A^* t}$$

où :

Q = Quantité totale d'eau durant un intervalle de temps

A = Aire normale à l'écoulement de l'échantillon de sol

L = Hauteur de l'échantillon

Δh = Charge hydraulique constante

t = Temps.

Pour ce qui est du calcul de perméabilité pour l'essai à charge variable, l'équation suivante est utilisée :

$$k = 2.3 * \frac{a * L}{\Delta t * A} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

où :

a = Aire du tube de mesure

A = Aire normale à l'écoulement de l'échantillon de sol

L = Hauteur de l'échantillon

 $\Delta t$  = Temps entre deux valeurs de charge hydraulique

 $h_1$  et  $h_2$  = Valeurs de charge hydraulique.

# Tableaux

	Longueur	Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Énaisseur de naroi	angle de coupe o	Segment a	ICR	Δ	
Types de tube	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(%)	(%)	B/t
127mm mince	1000	120.8	127	3.1	6	25.4	0	10.5	41
127mm épais	1000	120.8	133.5	6.35	6	25.4	0	22.1	21

Tableau 3 - 1 : Paramètres géométriques des tubes d'échantillonnage de 120,8 mm

# Figures



Figure 3 - 1 : Comparaison des tubes de 120,8 mm de diamètre intérieur avec le tube Shelby modifié (à gauche)



Figure 3 - 2 : Présentation du rapport de surface (A<sub>r</sub>) et du rapport de dégagement intérieur (ICR) et schéma de tube avec ou sans dégagement intérieur (ICR) (La Rochelle et al., 1981)



Figure 3 - 3 : Schéma montrant l'angle de coupe  $\alpha$  (modifié de Clayton et al., 1995)



Figure 3 - 4 : Déformations axiales le long d'une ligne centrale d'un échantillonneur idéalisé (Clayton, 1995)



Figure 3 - 5 : Abaque de salinité pour l'estimation de la salinité des différents échantillons



Figure 3 - 6 : Schéma montrant les axes utilisés pour la tomodensitométrie (CT-SCAN)



Figure 3 - 7 : Contrepression requise en fonction du degré de saturation initial et final (modifiée de la norme ASTM D4767-11)

# Chapitre 4 Site de l'Isle-Verte

Ce chapitre présente les résultats des essais de terrain et de laboratoire ayant été réalisés par le MTMDET et ses sous-traitants lors de la campagne de 2006, ainsi que ceux réalisés conjointement par le MTMDET, ses sous-traitants et l'Université Laval, lors de la campagne de l'été 2014. La Figure 4 - 1 présente la localisation des différents forages et essais ayant été réalisés près et sur le site d'étude. L'élévation du terrain naturel au site d'étude de l'Isle-Verte est approximativement de 26,50 m. Les Tableaux 4 - 1 et 4 - 2 présentent la synthèse des différents essais de terrain et de laboratoire en fonction des différentes campagnes géotechniques ayant eu lieu sur ce site.

## 4.1 Profil géotechnique de synthèse

La Figure 4 - 2 présente le profil géotechnique de synthèse construit à partir des données de la campagne de 2006 et des données obtenues pendant ce projet de recherche. Les différentes informations ayant servi à l'établissement du profil de synthèse sont présentées dans l'Annexe A à la fin du rapport, notamment l'Annexe A9 qui contient les profils géotechniques des forages F1 et F2.

## 4.2 Stratigraphie générale et hydrogéologie

Le site de l'Isle-Verte présente une stratigraphie à trois unités de sols cohérents, soit les unités supérieure, intermédiaire et inférieure. Une lentille de sable et gravier sépare approximativement l'unité supérieure de l'unité intermédiaire sur ce site. L'unité supérieure est constituée d'un silt argileux de couleur brun-gris à gris et de consistance très raide, avec des traces de gravier. L'unité supérieure se retrouve pratiquement à la surface, uniquement surmontée par 1 à 2 m de sable, qui dans ce cas constitue un matériau de remblai pour la chaussée. L'épaisseur de cette unité est d'environ 12 m jusqu'à la lentille de sable et gravier, qui elle a une épaisseur approximative de 4 m. Par la suite, l'unité intermédiaire débute à 9 m d'élévation et se termine au niveau de la mer, pour une épaisseur de 9 m. Cette unité est composée d'un silt argileux de couleur brun-gris et de consistance raide; un matériau assez semblable à celui de l'unité supérieure. Finalement, l'unité inférieure débute au niveau de la mer et se continue jusqu'à une élévation de -18 m, donc pour un total de 18 m d'épaisseur. Il y a environ 50 cm de sable silteux et graveleux qui sépare l'unité inférieure du roc. Cette unité est également composée de silt et argile de couleur brun-gris, mais est de consistance moyenne. Les laminations qui sont présentes dans cette unité et observées à la tomodensitométrie ne sont pas visibles à l'œil nu. Il est important de noter que le niveau du roc varie beaucoup sur ce site. En effet, il y a une différence de 8 m du niveau du roc entre les deux culées du pont d'étagement, le roc au niveau de la culée nord étant plus élevé qu'au niveau de la culée sud. Il y a quelques échantillons qui présentent des traces pouvant avoir été laissées par d'anciennes structures organiques sans orientation précise. Ces traces se retrouvent dans les trois différentes unités. La Figure 4 - 3 montre un exemple.

Lors de la campagne de 2014, le manque de temps a fait en sorte qu'il n'a pas été possible d'installer de piézomètres sur le site de l'Isle-Verte. Les données de pressions interstitielles proviennent du piézomètre installé dans le forage F2 lors de la campagne 2006. Ce piézomètre n'est plus accessible, mais les données récoltées lors de cette campagne indiquent que les pressions interstitielles à une profondeur de 33 m sont légèrement supérieures à la condition hydrostatique. Les surpressions à ce moment étaient d'environ 40 kPa. Toutefois, ces valeurs proviennent des lectures ayant été prises seulement 9 jours après l'installation, soit le 24 mars 2006. L'Annexe A2 - 1 présente ces valeurs. Ceci fait en sorte qu'il est possible que les surpressions dues à l'installation n'aient pas eu le temps de se dissiper totalement. Le profil de contraintes effectives présenté sur le profil de synthèse a été calculé en utilisant les valeurs de pressions interstitielles disponibles.

## 4.3 Datation

La première datation a été réalisée sur un coquillage qui provient de la base de l'unité intermédiaire (tube TM5), à une profondeur entre 23,17 et 23,46 m (3,17 à 2,88 m d'élévation). L'âge obtenu suite à l'analyse AMS est de 13 480 ± 30 ans B.P. (avant 1950). La deuxième datation provient quant à elle de l'unité supérieure (échantillon S3-TM2), à une profondeur entre 10,32 et 10,42 m (16,02 à 15,92 m d'élévation). L'âge obtenu suite à l'analyse AMS est de 15 295 ± 35 ans B.P., mais tel qu'expliqué au Chapitre 6, cette datation peut être erronée. Bien qu'il faille être prudent sur l'âge de l'unité à partir d'un seul résultat, il est intéressant de noter que ces coquillages sont plus âgés que les dépôts de la mer de Champlain. La mer de Goldthwait a envahie l'embouchure du Saint-Laurent avant la mer de Champlain, et donc, certains dépôts sont plus vieux que ceux de celle-ci. Comme il a été montré par plusieurs auteurs, dont Locat (1977), Dionne (1977) et Hétu (1988), l'invasion de la mer de Goldthwait a débuté entre 14 000 et 13 700 ans B.P. sur le territoire du Bas-Saint-Laurent jusqu'à Trois-Pistoles. Ces informations sont traitées plus en détails au Chapitre 6.

Ces datations sont faites à partir des quelques coquillages retrouvés dans les échantillons de sol. La Figure 4 - 4 montre un exemple de coquillage récupéré. Il s'agit possiblement de coquillage de type *Hiatella arctica*, une espèce de mollusque bivalve vivant dans les eaux froides et salées (Locat, 1976). La taille habituelle de ces mollusques peut atteindre environ 25 mm, mais ceux retrouvés dans les échantillons sont de taille plus modeste, entre 10 et 15 mm (WoRMS). Aucun coquillage n'a été trouvé dans les échantillons de l'unité inférieure. Ceux trouvés proviennent des unités supérieure et intermédiaire.

## 4.4 Tomodensitométrie (CT-SCAN)

Les Figures 4 - 5 à 4 - 7 présentent un exemple de chaque unité de sol pour l'Isle-Verte. Tous les autres résultats de la tomodensitométrie sont présentés dans l'Annexe A1. Il est possible de voir que les échantillons (ou tubes) provenant des unités supérieure et intermédiaire ne possèdent pas de laminations. La matrice du sol est donc homogène et massive. L'ensemble est toutefois hétérogène dû à la présence de graviers dans le sol. Ce qui est le plus marquant, c'est la

différence entre ces deux unités et l'unité inférieure, qui elle montre de fines laminations et donc un mode de déposition différent. Ces laminations semblent légèrement inclinées par rapport à l'horizontal.

## 4.5 Caractérisation physico-chimique

Les essais de base ont été effectués lors du détubage ainsi que sur les retailles d'échantillons servant à réaliser les essais oedométriques et triaxiaux.

## 4.5.1 Salinité

La salinité a été déterminée sur un échantillon de sol par unité. La faible teneur en eau des échantillons fait en sorte que la quantité de sol nécessaire pour obtenir assez d'eau interstitielle est trop importante pour le nombre d'échantillons disponible. Le tableau des résultats est présenté à l'Annexe A7 - 1 et aussi à la Figure 4 - 2. Pour l'unité supérieure, l'échantillon CR2-A (élévation de 19,59 m) montre une salinité de 15,7 g/l. L'unité intermédiaire présente une salinité de 25,4 g/l pour l'échantillon S4-TM4 (élévation de 5,97 m) et l'unité inférieure possède une salinité de 28,6 g/l (élévation de -1,18 m) pour l'échantillon S2-TM6. La salinité croissante avec la profondeur est logique, car l'échantillon de l'unité inférieure se situe sous le niveau de la mer.

## 4.5.2 Analyses granulométriques

Malgré le peu d'analyse granulométrique à l'Isle-Verte, le profil granulométrique montre que la granulométrie est plutôt constante sur toute la colonne de sol. Le pourcentage d'argile varie entre 34 et 53 % sur l'ensemble du dépôt et les sols sont plutôt considérés comme des silts argileux. La moyenne est de 45 %, mais celle-ci n'est pas nécéssairement représentative étant donné le peu d'analyse effectuée. Du sable et du gravier se retrouvent principalement en traces, bien que quelques gros graviers se retrouvent dans les échantillons. Ceux-ci sont généralement de l'ordre de 1 à 2 cm de diamètre. Des cailloux sont également présents en trace, avec un diamètre jusqu'à près de 10 cm. Les résultats des différentes analyses granulométriques sont présentés aux Annexes A7 - 3 à A7 - 5.

## 4.5.3 Teneurs en eau et limites d'Atterberg

Le profil de synthèse montre les teneurs en eau et limites d'Atterberg qui ont été obtenues lors des deux campagnes (Figure 4 - 2). L'Annexe A7 - 6 présente le tableau qui résume ces caractéristiques. L'unité supérieure est caractérisée par des teneurs en eau faible, autour de 20 %, qui sont près de la limite de plasticité et parfois même inférieures à celle-ci. Les limites de liquidité varient entre 40 % et 48 %, tandis que les limites de plasticité varient entre 20 et 24 %. Ceci donne donc des indices de plasticité entre 19 et 25 %, la moyenne étant d'environ 20,5 %. Les teneurs en eau font en sorte que les indices de liquidité sont voisins de 0.

Pour ce qui est de l'unité intermédiaire, les limites d'Atterberg sont sensiblement les mêmes que pour l'unité supérieure. Toutefois, les teneurs en eau sont plus grandes, avec des valeurs d'environ 27 %. Par le fait même les indices de liquidité sont légèrement supérieurs à 0 et varient entre 0,2 et 0,4 et augmentent avec la profondeur.

L'unité inférieure montre un profil des teneurs en eau qui oscille entre 30 et 40 %. Les échantillons récupérés montrent des limites de liquidité plus faibles et par le fait même, des indices de liquidité plus élevés. Ces indices de liquidité ne dépassent toutefois pas l'unité, et augmentent avec la profondeur entre 0,5 et 0,8.

## 4.6 Caractérisation minéralogique

Les essais ont été effectués sur trois échantillons, soit un échantillon par unité de sol : CR4-A (unité supérieure), S2-TM5 (unité intermédiaire) et S2-TM6 (unité inférieure).

## 4.6.1 Diffraction des rayons X

Les résultats de l'analyse totale sur poudre et de l'analyse sur lame orientée montrent que les minéraux présents dans les échantillons de sol des différentes unités sont les mêmes. Les Annexes A8 - 3 à A8 - 8 présentent les résultats de toutes les analyses effectuées.

L'analyse sur poudre permet d'obtenir les différentes phases minéralogiques présentes dans le sol, sans toutefois donner d'indications sur la quantification de ces phases. Il est donc important de noter que l'ordre dans lequel apparaissent les minéraux ne correspond pas à une quantité, mais plutôt à l'intensité des pics des minéraux. Il est possible que deux pics principaux de deux minéraux différents se superposent, comme dans le cas du quartz et de l'illite, deux phases principales des unités de sol de la région. Voici les phases minéralogiques principales retrouvées dans les échantillons :

- clinochlore (chlorite)
- illite
- quartz
- albite
- chlorite
- calcite
- hornblende
- microcline
- pyrite
- palygorskite ou attapulgite (phyllosilicate de magnésium et d'aluminium)

Le quartz est facilement détectable par ses pics caractéristiques de 3,34Å, 4,23Å et 1,82Å. Dans le cas des feldspaths, les observations montrent que le pôle sodique est présent (albite), bien qu'il y ait présence également de microcline (feldpsath potassique) dans deux des trois échantillons (CR4-A et S2-TM6). Les pics principaux des feldpaths se ressemblent et il est préférable de réaliser des analyses chimiques pour déterminer avec certitude les types présents dans les échantillons. La calcite fait parti des minéraux retrouvés avec son pic caractéristique de 3,03Å. Finalement, il est possible de supposer que l'échantillon contient des traces d'amphiboles. Ces minéraux sont caractérisés par un pic typique à 8,4Å. Il semble également y avoir des traces de pyrite et d'attapulgite, qui est un phyllosilicate de magnésium et d'aluminium.

L'analyse sur lame orientée permet de déterminer les types de minéraux argileux qui composent les échantillons analysées. Les deux phases rencontrées sont l'illite et la chlorite (clinochlore). L'analyse sur poudre démontre également la présence de ces minéraux argileux, mais la triple analyse sur lame orientée permet clairement de confirmer leur présence. Les principaux pics de l'illite sont le 10Å, 5Å et le 3,33Å. Il s'agirait ici probablement plus de phlogopite ou de muscovite, car l'illite est un terme général pour désigner les minéraux de la fraction argileuse appartenant au groupe des micas <K<sub>2</sub>O et >H<sub>2</sub>O. Les pics de l'illite ne sont pas affectés par le traitement au glycerol et par le chauffage. Tous les pics caractéristiques de la chlorite sont également observés sur la lame nature, soit : 14Å, 7Å, 4,7Å et le 3,5Å. Il n'y a pas de changement lors de l'ajout de glycérol, ce qui est normal pour la chlorite. En général, lorsque chauffée, elle devrait perdre la totalité de ses pics, sauf le 14Å et le 7Å, ce dernier devrait augmenter en intensité. Dans notre cas, le pic de 7Å est encore présent mais avec une très faible intensité et le pic de 14Å a augmenté en intensité. Ceci peut s'expliquer par une chlorite riche en fer, contrairement à une chlorite riche en magnésium. Dans le cas d'une chlorite riche en fer, les pics pairs sont plus forts ( $7A \rightarrow$  plan 002) que les pics impairs (14Å  $\rightarrow$  plan 001). Lors du chauffage, l'intensité du pic de 14Å augmente et celle du pic de 7Å diminue.

Les deux seules phases argileuses présentes sont donc l'illite et la chlorite, ce qui est caractéristique des argiles retrouvées dans l'est du Canada (Locat et al., 1984). De plus, il est possible d'affirmer qu'il n'y a pas de différence du point de vue des phases minéralogiques entre les différentes unités de sol du site de l'Isle-Verte. Finalement, le faible bruit de fond dans les analyses permet de stipuler que la cristallinité des minéraux est grande dans tous les cas.

#### 4.6.2 Porosimétrie au mercure

Les essais de porosimétrie au mercure ont été réalisés sur les unités supérieure et inférieure du site de l'Isle-Verte, soit les échantillons CR2-B (19,46 m d'élévation) et S2-TM6 (27,47 m d'élévation). Deux mesures par échantillon ont été faites afin de déterminer le diamètre d'ouverture des pores. La Figure 4 - 8 présente les résultats des essais pour les deux unités. Dans un souci de clarté, elle ne montre qu'un seul des deux résultats de mesures par échantillon, mais ceux-ci sont identiques. Il est également à noter que les courbes ont été lissées (moyenne sur 7 mesures) afin de faciliter la lecture des graphiques et pour mieux montrer chacune des familles de pores. Pour le site de l'Isle-Verte, les résultats indiquent que l'échantillon provenant de l'unité supérieure (CR2-B) présente une seule famille de pores, d'un diamètre d'environ 0,1 µm. L'échantillon provenant de l'unité inférieure (S2-TM6) montre plutôt deux familles de pores distinctes, soit une famille à environ 0,1 µm et une autre à environ 0,6 µm de diamètre. L'échantillon S2-TM6 présente donc des micro-pores (intra-aggrégats) et des macro-pores (inter-aggrégats), contrairement à l'échantillon de l'unité supérieure qui ne montre que des micro-pores.

#### 4.6.3 Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage a permis d'obtenir des images claires de la structure interne des unités supérieure et inférieure du site de l'Isle-Verte. La Figure 4 - 9 présente une série

d'images de l'unité supérieure, provenant de l'échantillon CR2-B. Il est possible d'y observer un grain de silt (image E) d'environ 35 µm qui est entouré par la matrice argileuse. La structure est très compacte et fermée, ce qui est cohérent avec le degré de surconsolidation de cette unité, ainsi qu'avec la teneur en eau très faible d'environ 20 %. Les vides (image C) présents dans ces images correspondent à l'arrachement de grains de silt ou de sable lors de la préparation de l'échantillon. Les Figures 4 - 10 et 4 - 11 montrent les séries d'images correspondant à l'échantillon S2-TM6 de l'unité inférieure. Bien que la structure soit très fermée, il est possible d'observer qu'elle est tout de même plus ouverte que celle de l'échantillon de l'unité supérieure. Ceci est également cohérent avec le résultat de la porosimétrie au mercure qui indique que l'unité inférieure possède 2 familles d'ouverture de pores et donc, que sa compressiblité est plus grande. Des grains de silt peuvent également être observés, notamment sur la Figure 4 - 11.

#### 4.6.4 Surface spécifique totale

Le tableau de l'Annexe A8 - 9 et la figure de l'Annexe A8 - 10 montrent les résultats des essais de surface spécifique pour les échantillons de l'Isle-Verte. Les valeurs de surface spécifique totale obtenues pour les échantillons CR4-A (unité supérieure), S2-TM5 (unité intermédiaire) et S2-TM6 (unité inférieure) sont respectivement de 48 m²/g, 31 m²/g et 38 m²/g. Les valeurs typiques pour les minéraux argileux comme la chlorite et l'illite sont respectivement d'environ 15 m²/g et 30 m²/g (St-Gelais, 1990). Techniquement, plus il y a de farine de roche dans un sol, et plus la valeur de surface spécifique est faible. Dans ce cas-ci, étant donné les valeurs plus élevées que celles des minéraux purs, il est possible que la quantité de farine de roche soit moins importante que pour les argiles provenant du nord du fleuve Saint-Laurent. Toutefois, seule une analyse quantitative pourrait le démontrer, ce qui n'a pas été fait ici.

## 4.6.5 Capacité d'échange cationique

Le tableau de l'Annexe A8 - 11 montre les résultats des essais pour déterminer la capacité d'échange cationique. Les mesures sont données en meq/100g de sol et l'erreur relative est de 7 %. L'unité supérieure (CR4-A) possède une capacité d'échange cationique de 8,8  $\pm$  0,6 meq/100g, l'unité intermédiaire (S2-TM5) de 7,8  $\pm$  0,6 meq/100g et finalement, l'unité inférieure (S2-TM6) de 6,9  $\pm$  0,5 meq/100g. Les trois valeurs obtenues sont pratiquement les mêmes. Il semble toutefois y avoir une petite diminution de l'unité supérieure vers l'unité inférieure, mais davantage d'essais seraient nécessaires pour le prouver. Les valeurs obtenues sont toutefois très faibles et même plus faibles que les résultats attendus. En effet, pour un sol argileux composé principalement d'illite et de chlorite, les valeurs de capacité d'échange cationique auraient du être de l'ordre de 10 à 40 meq/100g (UNSW, 2014). Toutefois, ces résultats peuvent s'expliquer par la forte présence de minéraux tels que le quartz et les feldspaths dans la fraction argileuse et par le fait que les phyllosilicates ne représentent qu'un faible pourcentage des échantillons (St-Gelais, 1990). Les courbes granulométriques montrent que la fraction plus petite que 2 µm varie entre 34 et 53 % et comme celle-ci est majoritairement composée de farine de roche, la quantité de minéraux argileux dans le sol est faible.

## 4.6.6 Pourcentage de carbonates total (Analyse thermogravimétrique)

L'Annexe A8 - 12 présente les résultats obtenus suite à l'analyse thermogravimétrique (ATG) sur les échantillons du site de l'Isle-Verte. Le pourcentage de carbonates des unités intermédiaire et inférieure est égal avec une valeur de 4,2  $\pm$  0,2 %, tandis que l'unité supérieure montre une quantité de carbonates supérieure avec 6,8  $\pm$  0,2 %. Bien entendu, ces résultats proviennent de l'analyse d'un seul échantillon par unité et davantage de résultats seraient nécessaires afin de stipuler sur l'exactitude de cette tendance. Les Annexes A8 - 13 à A8 - 15 présentent les courbes de perte de masse en fonction de la température utilisées pour déterminer les pourcentages de carbonates.

## 4.6.7 Pourcentage de carbonates total (Chittick)

L'Annexe A8 - 16 présente les résultats obtenus suite à l'essai Chittick pour la détermination du pourcentage de carbonates total dans chacune des unités de sol à l'Isle-Verte. Les valeurs obtenues sont de 5,4  $\pm$  0,3 % pour l'unité supérieure, 4,9  $\pm$  0,3 % pour l'unité intermédiaire et 6,2  $\pm$  0,3 % pour l'unité inférieure. Ces valeurs sont très proches pour les trois unités, surtout entre l'unité supérieure et intermédiaire. Les résultats des deux différents essais sont inverses. La L'analyse thermogravimétrique indique que le pourcentage de carbonates total le plus élevé est associé à l'unité supérieure, tandis que la méthode Chittick indique que c'est l'unité inférieure qui possède le pourcentage de carbonates total le plus élevé.

## 4.7 Caractérisation mécanique (terrain)

Cette section porte sur les résultats des différents essais de terrain reliés aux caractéristiques mécaniques des sols.

## 4.7.1 Essai de pénétration standard (SPT)

Le manque de temps a fait en sorte qu'il n'a pas été possible de faire un essai SPT avec l'analyseur de battage pour ce site. Les indices N bruts présentés dans le profil de synthèse (Figure 4 - 2) proviennent des essais SPT réalisés lors de la campagne de 2006. Ce profil montre des valeurs très élevées d'indice N pour un sol argileux. Ces valeurs varient entre 9 et 37 dans l'unité supérieure. Celles-ci diminuent graduellement dans l'unité intermédiaire jusqu'à atteindre des valeurs qui varient de 4 à 10 dans l'unité inférieure et qui augmentent légèrement avec la profondeur. Bien que ces valeurs soient beaucoup plus faibles, elles sont tout de même élevées pour un sol argileux. Généralement, les argiles de l'est du Canada montrent des indices N de 0 ou de 1.

## 4.7.2 Essais scissométriques

Aucun profil scissométrique n'a été fait lors de la campagne de 2014. Toutefois, deux profils ont été effectués dans les deux forages F1 et F2 de la campagne 2006. Les deux profils scissométriques sont présentés sur le profil de synthèse (Figure 4 - 2). Il est possible d'observer que le profil fait en F2 est beaucoup plus dispersé que celui réalisé en F1. Pour l'unité inférieure, la valeur moyenne est de 67 kPa en F1 (entre 59 et 88 kPa), tandis qu'elle est de 51 kPa en F2 (entre 22 et 72 kPa). Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé augmentent légèrement

avec la profondeur. La réalisation d'essais scissométriques est impossible dans l'unité supérieure étant donné la consistance très raide du silt argileux. Quelques valeurs sont prises à la base de l'unité intermédiaire, celles-ci correspondent aux valeurs obtenues dans l'unité inférieure.

#### 4.7.3 Essais au piézocône et au piézocône sismique

Trois piézocônes et un piézocône sismique ont été complétés près ou au site de l'Isle-Verte pour la campagne géotechnique 2014. Le premier piézocône, C-01 (Annexe A4 - 2), est situé un peu plus au nord, près d'un déblai sur la route Coteau-des-Érables (voir Figure 4 - 1). Dans ce cas-ci, le roc est à une élévation supérieure (élévation d'environ -2 m) et il semble que seules les unités supérieure et intermédiaire s'y trouvent. En examinant le profil, il est possible de diviser en deux unités le sol analysé. L'unité supérieure est présente sur environ 15 à 17 m d'épaisseur, où le rapport B<sub>q</sub> demeure faible sous des valeurs de 0,3. Le reste du profil montre une résistance en pointe un peu plus faible et des valeurs de B<sub>q</sub> d'environ 0,4, jusqu'au refus. Il semble y avoir une diminution graduelle de la résistance du sol, mis à part pour les 3 derniers mètres où cette résistance augmente. Ceci est possiblement dû à l'effet du roc qui influence les valeurs de résistance en pointe à son approche.

Le piézocône C-02 (Annexe A4 - 4) a été fait sur le tracé non utilisé de l'autoroute 20, mais à quelques centaines de mètres plus à l'est du site officiel (Figure 4 - 1). Il y a tout d'abord une couche de sable (remblai) de 3 m d'épaisseur qui est ensuite suivie de l'unité supérieure (B<sub>q</sub> entre 0 et 0,3) jusqu'au refus à 16 m de profondeur. L'hypothèse d'un niveau du roc plus élevé a été avancée, car les variations sont assez brusques dans les environs. Le choix s'est alors porté pour un dernier déplacement vers l'emplacement initial des premiers travaux effectués en 2006.

Au site des travaux effectués en 2006 par le MTMDET, un piézocône (C-03, Annexe A4 - 6) et un piézocône sismigue (CM-03, Annexe A4 - 8) ont été réalisés (Figure 4 - 1). Après coup, il est fort probable que le refus atteint dans C-02 ait été causé par des cailloux ou un bloc. Il s'agit probablement d'une autre lentille de sable et gravier, ou la même lentille, que celle rencontrée au site principal, car l'élévation du refus dans C-02 concorde avec cette lentille dans CM-03. Il est à noter que le piézocône sismique CM-03 a été réalisé en deux parties, car un refus sur bloc a empêché sa réalisation en continu. Pour le piézocône C-03 et la partie supérieure du piézocône sismique CM-03, la sonde DDG 1275 a été utilisé, mais les écarts trop importants lors du zéro de la sonde ont laissé croire à un problème. La sonde DDG 1221 a alors permis de compléter le sondage. Les piézocônes C-03 et CM-03 permettent d'obtenir un profil complet sur l'ensemble du dépôt et de définir les trois unités qui le compose. L'unité supérieure montre une résistance en pointe élevée, mais qui diminue assez graduellement jusqu'à l'unité intermédiaire, qui elle, montre un profil de résistance assez constant, tout comme les profils de frottement et de Ba le démontrent. Une fois l'unité inférieure atteinte, la résistance en pointe augmente graduellement avec la profondeur, tandis que son frottement et son rapport  $B_{\alpha}$  demeure constant. D'ailleurs, il est important de noter que le rapport B<sub>q</sub> déterminé au piézocône C-03 dans l'unité inférieure est légèrement supérieur à 1. Il y a une différence d'environ 200 kPa sur la valeur de qt dans les unités intermédiaire et inférieure. Celle-ci n'est pas très bien expliquée, mais peut être en lien avec le changement de sonde lors de la réalisation du piézocône sismique CM-03. En fait, ce changement de sonde a été réalisé car d'importantes variations de qt ont été remarquées lorsque le zéro de la sonde a été fait. La possibilité d'un bris de la sonde DDG 1275 a donc fait en sorte d'utiliser la sonde DDG 1221 afin de s'assurer un essai de bonne qualité.

Les profils de résistance au cisaillement non drainé (S<sub>u</sub>) obtenus à partir du piézocône sismique CM-03 ainsi qu'à partir du piézocône CPTu1 (F1 – 2006) sont superposés aux profils de S<sub>u</sub> par scissomètre de chantier (Figure 4 - 2). Pour obtenir un bon calage des profils, une valeur du paramètre N<sub>kT</sub> de 18 est utilisée. Celle-ci fonctionne bien pour les deux profils de piézocône. Il est alors possible d'obtenir des valeurs de résistance pour l'unité supérieure et l'unité intermédiaire. Pour l'unité supérieure, la résistance au cisaillement non drainé varie de 220 kPa à 140 kPa, en utilisant le profil CM-03. La résistance de l'unité intermédiaire est à peu près constante à environ 80 kPa, et celle de l'unité inférieure augmente légèrement avec la profondeur, avec une valeur moyenne de 67 kPa, telle que démontré par les résultats des essais scissométriques de la campagne de 2006. La valeur de N<sub>kT</sub> serait d'environ 14 si le piézocône C-03 était utilisé. Cette différence entre C-03 et CM-03 est possiblement dû à l'effet d'hystérésis lors de la réalisation de C-03. Toutefois, comme il y a un excellent accord en plus avec le piézocône CPTu1 et la valeur de 18, celle-ci est préférée.

La valeur de 3,4 a été utilisée pour le paramètre  $N_{\sigma T}$  afin d'obtenir un profil de contraintes de préconsolidation ( $\sigma'_p$ ). Celle-ci est tirée de Demers & Leroueil (2002), étant donné que les valeurs de  $\sigma'_p$  disponibles au site de l'Isle-Verte ne permettent pas de stipuler sur une valeur précise. Avec cette valeur, les deux profils de contrainte de préconsolidation (CM-03 et CPTu1) s'accordent très bien. À partir du profil de contraintes effectives, il est possible d'observer que l'unité supérieure est très fortement surconsolidée, que l'unité inférieure semble légèrement surconsolidée. Ceci concorde également avec les indices de liquidité qui sont plus élevés dans l'unité inférieure.

Il est également important de remarquer que les valeurs de frottement qui ont été mesurées par ces essais sont élevées, allant jusqu'à 200 kPa pour l'unité supérieure. Les valeurs de frottement dans l'unité intermédiaire sont de l'ordre de 40 kPa et de 20 kPa pour l'unité inférieure (Annexes A4 - 6 et A4 - 8).

Les profils de résistance en pointe (q<sub>t</sub>), de résistance au cisaillement non drainé (S<sub>u</sub>) et de contraintes de préconsolidation ( $\sigma_p$ ) permettent de bien voir la démarcation entre les trois unités (Annexe A4 - 8). Les valeurs du paramètre B<sub>q</sub> donnent également de bons indices quant à la délimitation des unités de sol. Le profil de B<sub>q</sub> du piézocône sismique CM-03 indique que la valeur de B<sub>q</sub> varie entre 0 et 0,2 dans l'unité supérieure, entre 0,4 et 0,55 dans l'unité intermédiaire et se stabilise à environ 0,9 dans l'unité inférieure.

Le profil de vitesse des ondes de cisaillement dans le sol ( $V_s$ ) est visible à l'Annexe A4 - 8. Les valeurs de ce profil proviennent des mesures directement obtenues lors de la réalisation du CPTu.

À partir de ce profil, il ne semble pas y avoir beaucoup de différence de  $V_s$  entre les unités supérieure, intermédiaire et inférieure. Il est toutefois possible d'obtenir des  $V_s$  à partir de relations empiriques. Les profils obtenus avec ces relations et la comparaison avec les mesures réelles sont discutés au Chapitre 7.

## 4.7.4 Essais pressiométriques

Des essais pressiométriques ont été effectués au voisinage des deux forages F1 et F2. La première série d'essais, au niveau du forage F2, donnait des résultats non satisfaisants. La méthode de mise en place a alors été changée pour les essais dans le forage F1, ce qui a permis d'obtenir de meilleurs résultats. La Figure 4 - 12 montre les valeurs obtenues de module pressiométrique (E<sub>M</sub>) en fonction de l'élévation. Il est possible d'observer la différence de module entre les deux forages F1 et F2 pour les quatre premier essais. En utilisant que les résultats de meilleure qualité, le module pressiométrique varie entre 34 et 75 MPa dans les unités supérieure et intermédiaire. Comme le module est beaucoup plus sensible au mode de mise en place, il n'est pas vraiment possible ici d'observer une différence entre les deux unités. L'Annexe 3 contient les tableaux de résultats ainsi que les courbes pressiométriques associées.

De plus, un profil de la résistance au cisaillement non drainé ( $S_{uPM}$ ) obtenue à partir de la pression limite des essais pressiométriques est présenté à la Figure 4 - 13. Un paramètre  $\beta$ ' de 11 a été utilisé par défaut, par manque d'information. Toutefois, selon Leroueil et al. (1983) et Baguelin et al. (1978), le paramètre  $\beta$ ' a tendance à augmenter avec la surconsolidation jusqu'à des valeurs de 12,5. La résistance au cisaillement non drainé obtenue varie entre 116 et 160 kPa pour l'unité supérieure et entre 98 et 126 kPa pour l'unité intermédiaire. La démarcation n'est pas franche, mais il semble que l'unité intermédiaire possède une résistance un peu plus faible que l'unité supérieure en regardant ces résultats.

## 4.8 Caractérisation mécanique (laboratoire)

Cette section présente les résultats obtenus suite aux essais oedométriques et aux essais triaxiaux à partir des échantillons récupérés lors de la campagne d'échantillonnage de l'été 2014.

## 4.8.1 Essais oedométriques

Au total pour cette campagne, 8 échantillons ont été soumis à des essais oedométriques, soit 5 échantillons provenant de l'unité supérieure, 2 échantillons de l'unité intermédiaire et 1 échantillon de l'unité inférieure. Les essais oedométriques réalisées sur les échantillons récupérés donnent des courbes de compression typiques des sols possédant de faibles indices des vides naturels. Comme il est possible de le constater sur les figures présentées dans l'Annexe A5, les courbes de compression ne montrent pas le cassé typique des courbes de compression des argiles de la mer de Champlain (Leroueil et al., 1983). Il devient alors très difficile de faire l'analyse de ces courbes et d'obtenir une valeur fiable de pression de préconsolidation. Cette annexe contient les courbes oedométriques analysées provenant des échantillons récupérés dans le forage F2 (1 échantillon dans l'unité intermédiaire et deux échantillons dans l'unité inférieure), ainsi que celles obtenues suite à la campagne d'échantillonnage de 2014.

Lorsque cela s'est avéré possible, des essais oedométriques ont été réalisés sur deux échantillons se situant à la même élévation, mais qui ont été prélevés selon les deux méthodes d'échantillonnage, soit par tube de grand diamètre ou par carottage. La Figure 4 - 14 compare les essais CR2-A et S2-TM1 (tube épais) (élévation d'environ 19,50 m). Dans les deux cas, les courbes sont typiques des sols argileux à faibles indices des vides, permettant difficilement la détermination de la contrainte de préconsolidation. L'échantillon prélevé par carottage (CR2-A) montre un indice des vides légèrement plus élevé et un indice de compression également plus élevé que l'échantillon prélevé par tube (S2-TM1). La Figure 4 - 15 compare les échantillons CR4-A et S2-TM2 (tube épais) prélevés à une élévation d'environ 16,15 m. L'échantillon prélevé par carottage possède un indice de compression un peu plus élevé.

Les valeurs de  $\sigma'_p$  obtenues par ces essais oedométriques sont présentées sur le profil de synthèse (Figure 4 - 2) et sont superposées au profil de  $\sigma'_p$  provenant du piézocône sismique CM-03. Pour l'unité supérieure, les pressions de préconsolidation obtenues sont variables, mais concordent tout de même avec le profil de  $\sigma'_p$  du piézocône sismique CM-03 et montrent le degré de surconsolidation du sol. Pour les unités intermédiaire et inférieure, les  $\sigma'_p$  sont toutes plus faibles que le profil. Les essais se situant dans l'unité inférieure montrent même des  $\sigma'_p$  plus faibles que le profil de contraintes effectives. Ceci n'est possible que pour des sols sousconsolidés, ce qui n'est assurément pas le cas ici.

Le Tableau 4 - 3 présente les valeurs d'indices de compression et de recompression pour les échantillons du site de l'Isle-Verte. Les indices de recompression sont déterminés graphiquement avec la partie initiale de la pente. L'indice de recompression  $C_{s d-r}$  correspond à la pente de la ligne de déchargement final. Pour les unités supérieure et intermédiaire, l'indice de compression est typiquement de 0,20 et l'indice de recompression de 0,07. Pour l'unité inférieure, un seul essai a été réalisé et il est difficile de conclure.

#### 4.8.2 Essais triaxiaux

Au total, 6 échantillons ont été soumis à des essais triaxiaux CIU. Ces échantillons sont répartis entre les différentes unités, soit : 4 échantillons dans l'unité supérieure, 1 échantillon dans l'unité intermédiaire et finalement, 1 échantillon au sommet de l'unité inférieure. Le Tableau 4 - 4 présente les contraintes de consolidation qui correspondent à la contrainte verticale effective des échantillons. Il n'y a que l'échantillon S3-TM4 qui a été consolidé à une contrainte plus élevée que  $\sigma'_{v0}$ , par erreur. La contrainte verticale effective de l'échantillon est en réalité de 185 kPa, alors qu'il a été consolidé à une contrainte de 225 kPa. Dans tous les cas, les échantillons sont cisaillés dans le domaine surconsolidé et atteignent la rupture par plan de cisaillement unique ou par plans de cisaillement multiples (baril). La Figure 4 - 16 présente les 6 échantillons qui ont été cisaillés, après séchage à l'étuve. Il n'y a que les échantillons S2-TM1 et S1-TM2 qui montrent une rupture par plan de cisaillement, avec des angles  $\alpha$  respectifs de 60° et 65° par rapport à l'horizontal.

Les Figures 4 - 17 à 4 - 19 présentent la comparaison des résultats des essais CIU pour les échantillons CR2-C et S2-TM1 qui proviennent d'une élévation relativement semblable (environ 19,20 m), mais qui ont été récupérés par carottage et par tube de grand diamètre. À cause de la diminution plus importante des pressions interstitielles, l'échantillon S2-TM1 montre une résistance plus élevée pour un même taux de déformation. Les cheminents de contraintes montrent un comportement dilatant dans les deux cas.

Les Figures 4 - 20 à 4 - 22 présentent la comparaison des résultats des essais CIU pour les échantillons CR4-C et S1-TM2 qui proviennent d'une élévation relativement semblable (environ 16,20 m), mais qui ont été récupérés par carottage et par tube de grand diamètre. L'échantillon S1-TM2 montre un comportement contrainte – déformation différent, où la résistance atteint un plateau à environ 7 % de déformation et diminue graduellement par la suite, contrairement à l'échantillon CR4-C qui montre un comportement écrouissage jusqu'à la fin de l'essai. Les cheminents de contraintes sont pratiquement identiques et montrent un comportement dilatant dans les deux cas.

La Figure 4 - 23 présente le comportement contrainte – déformation de la totalité des essais CIU réalisés au site de l'Isle-Verte. Les essais présentent tous un comportement de type écrouissage, excepté l'échantillon S1-TM2.

Les cheminements de contraintes de tous les essais des unités supérieure et intermédiaire montrent un comportement dilatant, tandis que l'échantillon S3-TM6 de l'unité inférieure ne montre pas ce même comportement. Son cheminement de contraintes atteint l'enveloppe de résistance, mais sans montrer le même niveau de dilatance que les autres échantillons. Un essai à plus grande déformation aurait été nécessaire pour compléter son cheminement de contraintes et pour préciser ses paramètres de résistance. L'enveloppe de résistance générale peut être tracée et celle-ci est présentée à la figure Figure 4 - 24, avec les cheminements de contraintes en représentation de Lambe. À partir des données disponibles, il n'apparaît pas possible de définir des paramétres de résistance différents d'une unité à l'autre et donc, tous les essais sont regroupés sur le même graphique. L'angle de frottement  $\phi'$  varie entre 26,5° et 28,5°, tandis que la cohésion c' varie entre 8 et 18 kPa. Les paramètres représentatifs de l'enveloppe de résistance sont un angle de frottement  $\phi'$  de 28° et une cohésion c' de 9 kPa.

La Figure 4 - 25 présente le profil des résistances au cisaillement non drainé obtenues à une déformation de 13,4 à 14,1 %, suite aux essais CIU après consolidation à des contraintes voisines des contraintes en place, donc dans le domaine surconsolidé. Pour l'unité supérieure, cette résistance au cisaillement varie entre 80 et 130 kPa pour des déformations entre 13,4 et 13,9 %. Pour l'unité intermédiaire, le seul essai donne une valeur de 145 kPa à 13,6 % de déformation, tandis que pour l'unité inférieure, la valeur est de 106 kPa à 14,1 % de déformation.

## 4.9 Caractérisation hydraulique

Des essais de perméabilité ont été réalisés sur trois échantillons pendant la réalisation des essais oedométriques, soit un échantillon par unité de sol. L'Annexe A7 - 7 présente le tableau des résultats obtenus et les Annexes A7 - 8 à A7 - 10 montrent les graphiques ayant permis d'obtenir la valeur de k<sub>0</sub>. L'essai de l'unité supérieure a été réalisé à charge variable, tandis que les deux autres essais ont été faits à charge constante, en fonction des montages et cellules oedométriques disponibles. Les valeurs de conductivité hydraulique k<sub>0</sub> à l'indice des vides naturel sont de 5,1x10<sup>-11</sup> m/s pour l'unité supérieure, 3,2x10<sup>-10</sup> m/s pour l'unité inférieure. À partir de ces résultats, il est possible de voir que l'unité supérieure est légèrement moins perméable que l'unité inférieure et que cette dernière possède une perméabilité relativement semblable à celle de l'unité intermédiaire. Il y a des difficultés reliées à l'essai de perméabilité, notamment les fuites et chemins préférentiels pour le premier essai. C'est-à-dire que si l'échantillon n'est pas suffisament collé sur l'anneau métallique qui l'entoure, il peut se créer un chemin préférentiel où l'eau s'écoule beaucoup trop rapidement. Évidemment, ces essais ne sont pas pris en compte, mais cela augmente la durée totale des essais oedométriques avec mesure de perméabilité.

## 4.10 Synthèse des unités de sol de l'Isle-Verte

## 4.10.1 Unité supérieure

L'unité supérieure possède une épaisseur de 12 m (entre 25 et 13 m d'élévation), est composée d'un silt argileux de couleur brun-gris à gris et est caractérisée par une consistance très raide. Le poids volumique moyen est de 21 kN/m<sup>3</sup>. Des traces de sable et de graviers, et même de cailloux, se trouvent dans l'ensemble de l'unité; les cailloux atteignant jusqu'à 8 cm de diamètre. La tomodensitométrie montre que la matrice du sol de cette unité est homogène et ne possède pas de laminations, et que les graviers sont dispersés aléatoirement dans le sol, ne formant pas d'horizons spécifiques. Il peut également y avoir des fissures de matières organiques sans orientation spécifique. La salinité, mesurée à une élévation de 19,59 m, est de 15,7 g/l. Cette unité est caractérisée par des teneurs en eau faibles, autour de 20 %. Les limites de plasticité varient entre 20 et 24 %, tandis que les limites de liquidité varient entre 40 et 48 %. L'indice de plasticité varie donc entre 19 et 25 % et les indices de liquidité sont pratiquement toujours égaux à 0 ou moins. Les différents essais minéralogiques ont notamment permis d'obtenir une valeur de surface spécifique de 48 m<sup>2</sup>/g, une valeur de capacité d'échange cationique de 8,8 meg/100g et une valeur de carbonate total de 5,4 %. Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'essai de pénétration standard donne des valeurs d'indices N qui varient entre environ 9 et 37 dans cette unité. Le scissomètre de chantier ne peut pas être utilisé dans cette couche, mais l'utilisation du pressiomètre et de l'essai triaxial permet d'avoir une idée de la résistance au cisaillement non drainé. Au pressiomètre, les valeurs de résistance obtenues en considérant un paramètre B' de 11 varient entre 115 et 160 kPa. Les essais triaxiaux CIU permettent d'obtenir des valeurs de résistance à des déformations de 13,4 à 13,9 % entre 80 et 130 kPa et montrent un comportement dilatant. Les pressions de préconsolidation obtenues à partir des essais oedométriques sont assez variables, notamment dû à la difficulté de l'analyse de la courbe. Toutefois, elles concordent relativement bien avec celles déduites du piézocône sismique CM-03 et montrent que l'unité supérieure est très surconsolidée, avec des valeurs d'OCR qui varient approximativement entre 14 et 6 en fonction de la profondeur. Ces essais eodométriques montrent également que les indices de compression sont faibles, avec des valeurs qui oscillent autour de 0,20 et des indices de recompression qui varient entre 0,06 et 0,09. L'essai de perméabilité à charge variable a permis de déterminer une perméabilité  $k_0$  de 5,1x10<sup>-11</sup> m/s.

#### 4.10.2 Unité intermédiaire

L'unité intermédiaire possède une épaisseur de 9 m (entre 9 et 0 m d'élévation), est composée d'un silt argileux de couleur brun-gris à gris et est caractérisée par une consistance très raide à raide. Le poids volumique moyen est de 20,1 kN/m<sup>3</sup>. Des traces de sable et de graviers se trouvent dans l'ensemble de l'unité. La datation, qui a été effectuée sur un coquillage provenant d'une élévation d'environ 3 m, révèle un âge de 13 480 ± 30 ans B.P. La tomodensitométrie montre que la matrice du sol de cette unité est également homogène et ne possède pas de laminations, et que les graviers sont dispersés aléatoirement dans le sol, ne formant pas d'horizons spécifiques. Il peut également y avoir des fissures de matières organiques sans orientation spécifique. La salinité, mesurée à une élévation de 5,97 m, est de 25,4 g/l. Cette unité est caractérisée par des limites d'Atterberg semblables à l'unité supérieure, soit des limites de plasticité entre 20 et 24 % et des limites de liquidité entre 40 à 50 %. L'indice de plasticité varie donc entre 20 et 25 %. Les teneurs en eau sont toutefois légèrement plus grandes que dans l'unité supérieure, avec des valeurs de 27 %, ce qui fait que les indices de liquidité varient entre 0,2 et 0,4. Les différents essais minéralogiques ont notamment permis d'obtenir une surface spécifique de 31 m<sup>2</sup>/g, une capacité d'échange cationique de 7,8 meq/100g et un pourcentage de carbonates total de 4,9 %. Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'essai de pénétration standard donne des valeurs d'indices N qui diminuent graduellement d'environ 34 à 10 dans cette unité. Le scissomètre de chantier n'a été utilisé que dans la partie inférieure de cette unité et les valeurs obtenues sont d'environ 60 kPa. L'utilisation du pressiomètre et de l'essai triaxial permet d'avoir une idée de la résistance au cisaillement non drainé. Au pressiomètre, les valeurs de résistance obtenues à partir d'un paramètre B' de 11 varient entre 100 et 125 kPa, pour seulement 2 données. Le seul essai triaxial CIU dans cette unité donne une résistance à une déformation de 13.6 % d'environ 145 kPa avec un comportement dilatant. Les pressions de préconsolidation obtenues à partir des essais oedométriques sont légèrement plus faibles que celles indiquées par le profil obtenu au piézocône sismique. Il est toutefois possible de voir que l'unité intermédiaire est légèrement surconsolidée, avec des valeurs d'OCR qui varient approximativement entre 2,3 et 1,7. Ces essais eodométriques montrent également que les indices de compression sont faibles, avec des valeurs qui oscillent autour de 0,21 et des indices de recompression qui sont de 0,07. L'essai de perméabilité à charge constante donne une perméabilité  $k_0$  de 3,2x10<sup>-10</sup> m/s.

#### 4.10.3 Unité inférieure

L'unité inférieure possède une épaisseur d'environ 18 m (entre 0 et -18 m d'élévation), est composée d'un silt argileux à silt et argile de couleur brun-gris et est caractérisée par une consistance moyenne. Le poids volumique moyen est de 19,3 kN/m<sup>3</sup>. L'épaisseur de l'unité varie en fonction du socle rocheux sous-jascent qui varie beaucoup sur de courtes distances. La tomodensitométrie montre des laminations assez fines dans cette unité, ce qui la différencie des unités supérieure et intermédiaire. Ces laminations ne sont pas visibles à l'œil nu. La salinité, mesurée à une élévation de -1,18 m, est de 28,6 g/l. Les limites de plasticité varient entre 20 et 24 % et les limites de liquidité entre 34 et 47 %. En fait, ces limites de liquidité semblent diminuer graduellement avec la profondeur. L'indice de plasticité varie donc entre 15 et 25 %. Les teneurs en eau sont toutefois légèrement plus grandes que dans l'unité supérieure, avec des valeurs entre 30 et 40 %, ce qui fait que les indices de liquidité varient approximativement entre 0,5 et 0,8. L'essai de diffraction des rayons X permet d'affirmer que les phases minéralogiques présentes dans cette unité sont les mêmes que pour les unités supérieure et intermédiaire. Ces minéraux sont le quartz, les feldspaths, la calcite, la hornblende et des amphiboles, en plus de l'illite et la chlorite pour les minéraux des argiles. Les différents essais minéralogiques ont notamment permis d'obtenir une surface spécifique de 38 m<sup>2</sup>/g, une capacité d'échange cationique de 6,9 meq/100g et un pourcentage de carbonates total de 6,2 %. Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'essai de pénétration standard donne des valeurs d'indices N variant entre 4 et 10 et augmentant légèrement avec la profondeur. Les deux profils de scissomètre de chantier donnent des valeurs constantes de résistance au cisaillement non drainé d'environ 60 kPa. Les valeurs obtenues au niveau du forage F2 montrent davantage de dispersion comparativement aux valeurs du forage F1. L'essai triaxial fournit des valeurs supplémentaires de résistance au cisaillement non drainé. Le seul essai triaxial CIU dans cette unité donne une résistance à une déformation de 14,1 % d'environ 106 kPa et présente également un comportement dilatant. La pression de préconsolidation obtenue à partir de l'essai oedométrique est légèrement plus faible que celle donnée par le profil de contraintes effectives, ce qui ressemble aux résultats de la campagne de 2006. Le profil de σ'p au piézocône sismique indique que l'unité inférieure est légèrement surconsolidée, avec des valeurs d'OCR d'environ 1,3. Cet essai eodométrique montre également que l'indice de compression est faible, avec une valeur de 0,25 et un indice de recompression qui est de 0.8. L'essai de perméabilité à charge constante donne une perméabilité k<sub>0</sub> de 3.2x10<sup>-10</sup> m/s.

## Tableaux

Campagne	Échantillonnage	Essais SPT	Essais pressiométriques	Piézométrie	Essais scissométriques	Piézocône	Piézocône sismique
MTMDET 2006	Х	Х	Х	Х	Х	Х	
MTMDET - ULAVAL 2014	х					Х	Х

Tableau 4 - 1 : Synthèse des essais de terrain pour le site de l'Isle-Verte en fonction des différentes campagnes géotechniques

Tableau 4 - 2 : Synthèse des essais de laboratoire pour le site de l'Isle-Verte en fonction des différentes campagnes géotechniques

Campagne	Essai de caractérisation de base	Granulométrie	Tomodensitométrie	Datation	Salinité	Essais de caractérisation minéralogique	Essais oedométriques	Essais de perméabilité	Essais triaxiaux CIU
MTMDET 2006	Х	Х					х		
MTMDET - ULAVAL 2014	Х	Х	Х	Х	Х	х	х	х	x

Échantillon	Élévation (m)	Unité	e <sub>0</sub>	σ' <sub>p</sub>	σ' <sub>v0</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>s</sub>	C <sub>s d-r</sub>
CR1-A	21.34		0.58	900	64	0.17	0.08	0.08
CR2-A	19.66		0.62	725	83	0.20	0.07	0.08
S2-TM1	19.26	Supérieure	0.54	1150	87	0.17	0.06	0.06
CR4-A	16.36		0.65	875	120	0.22	0.08	0.09
S2-TM2	16.12		0.63	1400	122	0.10	0.06	0.07
S4-TM4	6.03	Intermédiaire	0.78	315	227	0.22	0.03	0.07
S2-TM5	3.08	Interneulaire	0.80	310	253	0.21	0.06	0.07
S2-TM6	-1.09	Inférieure	0.94	200	290	0.25	0.06	0.08

Tableau 4 - 3 : Présentation des indices de compression et de recompression pour le site de l'Isle-Verte à partir des essais oedométriques

Tableau 4 - 4 :  $\sigma'_{v0}$  correspondant à la contrainte de consolidation pour les essais triaxiaux, avec  $\sigma'_p$  déduit du profil de piézocône CM-03

Échantillon	Élévation (m)	Unité	e <sub>o</sub>	σ' <sub>p</sub> (kPa)	σ' <sub>ν0</sub> (kPa)
CR2-C	19.32		0.57	1214	65
S2-TM1	19.16	Supérieure	0.54	1187	67
S1-TM2	16.17		0.56	1187	96
CR4-C	16.01		0.60	987	97
S3-TM4	6.09	Intermédiaire	0.73	423	225*
S3-TM6	S3-TM6 -1.32 Infér		0.80	313	243

## Figures



Système de coordonnées: Lat/Long, Degrés, -180 ==> +180 Datum: NAD 83 Échelle 1:5 000

Carte réalisée par: Kevin Hébert LIDAR 2013 - Provenance MTMDET





Figure 4 - 2 : Profil de synthèse pour le site de l'Isle-Verte



Figure 4 - 3 : Fissure de matière organique dans l'échantillon S2-TM2 du site de l'Isle-Verte



Figure 4 - 4 : Coquillage récupéré dans les échantillons de l'Isle-Verte







Figure 4 - 5 : CT-SCAN TM-02 – unité supérieure

Figure 4 - 6 : CT-SCAN TM-04 – unité intermédiaire

Figure 4 - 7 : CT-SCAN TM-06 – unité inférieure



Figure 4 - 8 : Résultats de l'essai de porosimétrie au mercure pour le site de l'Isle-Verte

Isle-Verte - CR2-B



Figure 4 - 9 : Images du MEB de l'échantillon CR2-B de l'unité supérieure du site de l'Isle-Verte

Isle-Verte - S2-TM6



Figure 4 - 10 : Images du MEB de l'échantillon S2-TM6 de l'unité inférieure du site de l'Isle-Verte
Isle-Verte - S2-TM6



Figure 4 - 11 : Deuxième série d'images du MEB de l'échantillon S2-TM6 de l'unité inférieure du site de l'Isle-Verte



Figure 4 - 12 : Profil des modules pressiométriques au site de l'Isle-Verte



Figure 4 - 13 : Profil de résistance au cisaillement non drainé déduite des essais pressiométriques au site de l'Isle-Verte pour un  $\beta$ ' = 11



Figure 4 - 14 : Comparaison des essais oedométriques CR2-A et S2-TM1 (élévation d'environ 19,50 m)



Figure 4 - 15 : Comparaison des essais oedométriques CR4-A et S2-TM2 (élévation d'environ 16,15 m)



Figure 4 - 16 : Photo des échantillons cisaillés au triaxial suite au passage à l'étuve



Figure 4 - 17 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – CR2-C et S2-TM1 – Isle-Verte



Figure 4 - 18 : Comparaison des variations des pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – CR2-C et S2-TM1 – Isle-Verte



Figure 4 - 19 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) – CR2-C et S2-TM1 – Isle-Verte



Figure 4 - 20 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – CR4-C et S1-TM2 – Isle-Verte



Figure 4 - 21 : Comparaison des variations des pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – CR4-C et S1-TM2 – Isle-Verte



Figure 4 - 22 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) – CR4-C et S1-TM2 – Isle-Verte



Figure 4 - 23 : Comportements contrainte – déformation de tous les essais CIU réalisés sur les échantillons du site de l'Isle-Verte



Figure 4 - 24 : Analyse des essais triaxiaux CIU pour le site de l'Isle-Verte après consolidation près de la contrainte effective moyenne en place



Figure 4 - 25 : Profil des résistances au cisaillement non drainé obtenues à la suite des essais triaxiaux CIU après consolidation à des contraintes voisines des contraintes en place au site de l'Isle-Verte

# Chapitre 5 Site de Notre-Dame-des-Neiges

Ce chapitre présente les résultats des essais de terrain et de laboratoire ayant été réalisés par le MTMDET et ses sous-traitants lors des campagnes de 2008 et 2012-2013, ainsi que ceux réalisés conjointement par le MTMDET, ses sous-traitants et l'Université Laval, lors de la campagne de l'été 2014. La Figure 5 - 1 montre la disposition des forages et différents essais de terrain réalisés durant les différentes campagnes géotechniques entre 2008 et 2014. L'élévation du terrain naturel au site d'étude de Notre-Dame-des-Neiges est approximativement de 86,50 m. Les forages de la campagne de 2008 se situant au niveau du lit et du côté est de la rivière Trois-Pistoles ne sont pas présentés dans ce rapport (F3 à F7). Les Tableaux 5 - 1 et 5 - 2 présentent la synthèse des différents essais de terrain et de laboratoire en fonction des différentes campagnes géotechniques ayant eu lieu sur ce site.

## 5.1 Profil géotechnique de synthèse

La Figure 5 - 2 présente le profil géotechnique de synthèse construit à partir des données des campagnes de 2008, de 2012-2013 et des données obtenues pendant ce projet de recherche (2014-2015). Les différentes informations ayant servi à l'établissement du profil de synthèse sont présentées dans l'Annexe B à la fin du rapport.

#### 5.2 Stratigraphie générale et hydrogéologie

Tel que montré sur le profil géotechnique (Figure 5 - 2), le dépôt argileux au site de Notre-Damedes-Neiges est composée de trois unités argileuses, soit les unités supérieure, intermédaire et inférieure. Toutefois, l'unité supérieure est surmontée d'une première couche de silt sableux d'environ 5 m et d'une couche de sable qui fait également environ 5 m, et qui peut être associé au delta de Trois-Pistoles. Donc, le début de l'unité supérieure se trouve à une dizaine de mètres de profondeur. L'élévation du terrain naturel est variable étant donné la proximité du talus qui mène à la rivière Trois-Pistoles. La plupart des forages se situent entre 80 et 87 m d'élévation, mais le forage F2 (campagne 2008), qui est situé dans le talus, est à une élévation de 60,81 m. L'unité supérieure se trouve donc à une élévation approximative de 76 m et possède une épaisseur d'environ 10 m. L'unité est constituée de silt argileux gris de consistance très raide à dure avec des traces de sable et de gravier. L'unité intermédiaire est également constituée de silt argileux gris de consistance très raide à dure. Il n'est pas possible de différencier les deux unités à l'œil nu. Tel que montré sur le profil de synthèse, l'épaisseur de l'unité intermédiaire est d'un peu plus de 3 m et sa base se situe à une élévation proche de 62 m. Le positionnement des limites de cette unité est difficile à réaliser, et dans ce cas-ci, c'est le rapport B<sub>q</sub> du profil du piézocône sismique CM-05 (Annexe B3 - 5) qui a permis de le faire. Ce positionnement concorde un peu plus mal avec les profils d'indices N, mais l'essai au piézocône est jugé plus représentatif que l'essai de pénétration standard. Vient ensuite l'unité inférieure, qui se termine pratiquement sur le roc, mis à part quelques dizaines de centimètres de matériaux plus grossiers à la base. Il s'agit d'une argile et silt de consistance raide et de couleur grise, avec des traces de sable et de gravier. Sa consistance permet tout de même de la différencier des autres unités, car la manipulation des échantillons à maines nue est plus délicate, c'est-à-dire qu'il est plus facile d'induire des déformations que pour les autres unités. Malgré les informations qui sont disponibles pour ce site, il demeure une certaine incertitude quant à la séparation des unités.

Le profil de contraintes effectives montré dans le profil de synthèse a été calculé à partir des pressions interstitielles provenant du forage F1, en date du 10 juillet 2013. Les valeurs de pressions interstitielles sont présentées dans l'Annexe B2 - 1 et il ne semble pas y avoir de variations saisonnières. La présence de matériaux granulaires au sommet de l'unité supérieure peut possiblement mener à la présence d'une nappe perchée si les conditions le permettent. La caractéristique principale du site provient de la proximité de la rivière Trois-Pistoles et de l'important talus d'une hauteur de 80 m. Ceci fait donc en sorte qu'il y a un gradient descendant qui est très important. Les pressions interstitielles à une profondeur de 30 m peuvent en effet être aussi faibles que 30 kPa. Cela fait en sorte que le profil de contraintes effectives est pratiquement le même que le profil de contraintes totales. Les pressions interstitielles obtenues aux Forages F2 (Annexe B2 - 2) et C1-2 (Annexe B2 - 3) montrent la même tendance. Un piézomètre de type Casagrande a été installé dans le forage FZ-05 lors de la campagne de terrain de 2014, à une profondeur de 40,50 m (46,14 m d'élévation), et quelques lectures ont été prises suite à cette installation (Annexe B2 - 4). Des valeurs d'environ 220 kPa ont été enregistrées à cette élévation. Il serait surprenant que les dissipations dans le piézomètre installé en 2014 n'aient toujours pas eu lieu, même 310 jours après l'installation. Toutefois, tous les autres piézomètres installés à une élévation à peu près sembable (dans F1, F2 et C1-2) montrent des valeurs très faibles de pression interstitielle, entre 15 et 35 kPa. La valeur de 220 kPa est probablement abérante, et pourrait être due à une contamination si le scellement du piézomètre n'est pas parfait.

## 5.3 Tomodensitométrie (CT-SCAN)

Les Figures 5 - 3 à 5 - 5 présentent un exemple de chaque unité de sol pour Notre-Dame-des-Neiges. Tous les autres résultats de la tomodensitométrie sont présentés dans l'Annexe B1. Il est possible de voir que les échantillons provenant des unités supérieure et intermédiaire ne possèdent pas de laminations. La matrice du sol est homogène. Ce qui est le plus marquant, c'est la différence entre ces deux unités et l'unité inférieure, qui elle, montre de fines laminations. Ces laminations sont inclinées selon un angle approximatif de 15° avec l'horizontal. Dans ce cas-ci, le tube TM6 a probablement subi un remaniement lors de la récupération, ce qui a pu provoquer le cisaillement observé.

## 5.4 Caractérisation physico-chimique

Les essais de base ont été effectués lors du détubage ainsi que sur les retailles d'échantillons servant à réaliser les essais oedométriques et triaxiaux.

#### 5.4.1 Salinité

La salinité a été déterminée sur un échantillon de sol pour les trois unités. Le tableau des résultats est présenté à l'Annexe B6 - 1. Pour l'unité supérieure, l'échantillon S2-TM1 (élévation de 72,60 m) montre une salinité de 1,5 g/l. L'unité intermédiaire, pour l'échantillon CR10-A, possède également une salinité de 1,5 g/l (élévation de 63,95 m). L'unité inférieure possède une salinité de 3,8 g/l à une élévation de 59,20 m (échantillon S1-TM6). Il serait nécessaire de refaire plusieurs autres analyses afin de confirmer les valeurs obtenues et également de tracer un profil plus complet de la salinité pour chacun de ces deux sites. Il est tout de même évident que ce site a subi un important lessivage, ce qui est dû d'une part à son élévation plus importante par rapport au niveau de la mer, et d'autre part par sa proximité de la rivière Trois-Pistoles qui crée un important gradient hydraulique et facilite le lessivage du dépôt.

#### 5.4.2 Analyse granulométrique

L'unité supérieure montre un pourcentage de fraction argileuse qui diminue de 66 à 33 % jusqu'à l'unité intermédiaire. Celle-ci présente une granulométrie plus grossière, avec une fraction argileuse entre 26 et 34 %. Le profil granulométrique de l'unité inférieure semble plus constant sur son ensemble, avec une fraction argileuse qui varie entre 33 et 57 %, avec une moyenne de 49 %. Les sols sont donc considérés comme un silt argileux à une argile et silt. Du sable et gravier se retrouvent principalement en traces, bien que quelques gros cailloux aient été observés dans les échantillons, dont le diamètre peut atteindre près de 10 cm. La plupart des graviers retrouvés ont plutôt un diamètre de l'ordre de 1 à 2 cm. En fait, du point de vue granulométrique, les sols du site de Notre-Dame-des-Neiges sont relativement semblables à ceux du site de l'Isle-Verte, bien que davantage d'analyses doivent être effectuées afin de s'en assurer. Les résultats des différentes analyses granulométriques sont présentés aux Annexes B6 - 3 à B6 - 7.

## 5.4.3 Teneurs en eau et limites d'Atterberg

Le profil de synthèse (Figure 5 - 2) montre les teneurs en eau et limites d'Atterberg qui ont été obtenus dans les différents essais effectués lors des deux différentes campagnes. L'Annexe B6 - 8 présente le tableau qui résume ces caractéristiques. L'unité supérieure est caractérisée par des teneurs en eau faibles, entre 18 et 24 %, qui sont près de la limite de plasticité et parfois même inférieures à celle-ci. Les teneurs en eau obtenues sur les échantillons recueillis directement à la sortie du sol des échantillons sont les mêmes que celles obtenues sur les échantillons utilisés pour les essais oedométriques et triaxiaux. Les limites de liquidité varient entre 40 et 46 % dans la moitié supérieure de l'unité supérieure, tandis qu'elles sont entre 30 et 32 % dans la moitié inférieure. Les limites de plasticité d'environ 25 % pour la moitié supérieure et de 12 à 17 % pour la moitié inférieure. Les indices de liquidité sont faibles, avec des valeurs entre 0 et 0,3 environ. La différence de plasticité entre la moitié supérieure et la moitié inférieure de l'unité supérieure de la partie supérieure du dépôt qui est très drainée, mais aucune indication physique ne permet de le confirmer.

Pour ce qui est de l'unité intermédiaire, les limites de plasticité varient entre 14 et 17 %, et les limites de liquidité sont beaucoup plus faibles que dans l'unité supérieure, avec des valeurs entre 22 à 26 %. Les indices de plasticité sont alors faibles, entre 8 et 13 %. Les indices de liquidité demeurent très faibles, approximativement entre 0 et 0,3.

Les teneurs en eau de l'unité inférieure sont légèrement plus élevées et semblent augmenter avec la profondeur, de 18 à 30 %. Les indices de plasticité sont toujours faibles avec des valeurs entre 7 et 10 %. Les teneurs en eau plus élevées font en sorte que les indices de liquidité sont donc plus élevés, entre 0,5 et 0,8.

## 5.5 Caractérisation minéralogique

Les essais ont été effectués sur deux échantillons, soit : CR8-A (unité intermédiaire) et CR13-A (unité inférieure). L'échantillon CR8-A se trouve à être à la limite entre l'unité supérieure (base) et l'unité intermédiaire (sommet), laquelle n'est pas évidente à définir.

## 5.5.1 Diffraction des rayons X

Les résultats de l'analyse totale sur poudre et de l'analyse sur lame orientée montrent que les minéraux présents dans les échantillons de sol des différentes unités sont également les mêmes que ceux du site de l'Isle-Verte. Les Annexes B7 - 1 à B7 - 4 présentent les résultats de toutes les analyses effectuées.

Voici les phases minéralogiques principales retrouvées dans les échantillons :

- clinochlore (chlorite)
- illite
- quartz
- albite
- chlorite
- calcite
- hornblende
- microcline
- pyrite

Tout comme pour les échantillons du site de l'Isle-Verte, ceux du site de Notre-Dame-des-Neiges présentent des phases minéralogiques semblables, qui ne semblent pas différer entre les différentes unités de sol. Les deux seules phases argileuses présentes sont également l'illite et la chlorite, ce qui est caractéristiques des argiles retrouvées dans l'est du Canada.

## 5.5.2 Porosimétrie au mercure

Les essais de porosimétrie au mercure ont été réalisés sur les unités supérieure et inférieure du site de Notre-Dame-des-Neiges, soit les échantillons S1-TM3 (68,29 m d'élévation) et S1-TM6 (59,19 m d'élévation). Deux mesures par échantillon ont été faites afin de déterminer le diamètre d'ouverture des pores. La Figure 5 - 6 présente les résultats des essais pour les deux unités. Dans

un souci de clarté, elle ne montre qu'un seul des deux résultats de mesures par échantillon, mais ceux-ci sont identiques. Il est également à noter que les courbes ont été lissées (moyenne sur 7 mesures) afin de faciliter la lecture des graphiques et pour mieux montrer chacune des familles de pores. Pour le site de Notre-Dame-des-Neiges, les résultats indiquent que l'échantillon provenant de l'unité supérieure (S1-TM3) présente une seule famille de pores, d'un diamètre d'environ 0,2  $\mu$ m. L'échantillon provenant de l'unité inférieure (S1-TM6) montre également une seule famille de pore d'un diamètre entre 0,2 et 0,3  $\mu$ m. Ces deux échantillons ne possèdent que des micro-pores, contrairement à l'échantillon de l'unité inférieure S2-TM6 du site de l'Isle-Verte qui en présente deux.

#### 5.5.3 Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage a permis d'obtenir des images claires de la structure interne des unités supérieure et inférieure du site de Notre-Dame-des-Neiges. La Figure 5 - 7 présente une série d'images de l'unité supérieure, provenant de l'échantillon S1-TM3. Il est possible d'y observer quelques grains de silt (images C-D-E) de quelques dizaines de micromètres qui sont entourés par la matrice argileuse. La structure est très compacte et fermée, tout comme à l'Isle-Verte, ce qui est cohérent avec le degré de surconsolidation de cette unité ainsi qu'avec la teneur en eau très faible qui oscille entre 18 et 20 %. Les Figures 5 - 8 et 5 - 9 montrent les séries d'images correspondant à l'échantillon S1-TM6 de l'unité inférieure. Contrairement au site de l'Isle-Verte, la structure interne de l'unité inférieure est également très compacte et fermée, et ne présente pas de pores apparents. Ceci est également cohérent avec le résultat de la porosimétrie au mercure qui indique que l'unité inférieure ne possède qu'une seule famille d'ouverture de pores. Les vides (images C-D, Figure 5 - 9) présents dans ces images correspondent à l'arrachement de grains de silt ou de sable lors de la préparation de l'échantillon.

#### 5.5.4 Surface spécifique totale

Le tableau de l'Annexe B7 - 5 et la figure de l'Annexe B7 - 6 montrent les surfaces spécifiques pour les échantillons de Notre-Dame-des-Neiges. Les valeurs de surface spécifique totale obtenues pour les échantillons CR8-A (unité intermédiaire/supérieure) CR13-A (unité inférieure) sont respectivement de 20 m²/g et 27 m²/g. En se fiant aux valeurs de surface spécifique des minéraux argileux les plus courants (St-Gelais, 1990), ces valeurs concordent avec les types de minéraux argileux retrouvés dans les analyses de diffraction des rayons X, soit l'illite et la chlorite. Ces faibles valeurs sont dues à la faible quantité de minéraux argileux dans les échantillons, et également à la quantité de farine de roche qui est probablement importante. Pour ce site, les deux valeurs sont sensiblement les mêmes. Toutefois, les valeurs sont relativement plus faibles que celles obtenues au site de l'Isle-Verte.

#### 5.5.5 Capacité d'échange cationique

Le tableau de l'Annexe B7 - 7 montre les capacités d'échange cationique. Les mesures sont données en meq/100g de sol. L'unité intermédiaire/supérieure (CR8-A) possède une capacité d'échange cationique de 4,3  $\pm$  0,3 meq/100g et l'unité inférieure (CR13-A) de 6,0  $\pm$  0,4 meq/100g.

Ces résultats montrent que la capacité d'échange cationique est légèrement supérieure pour l'unité inférieure, mais que ces valeurs sont encore très faibles pour des sols argileux de types illitiques. Tout comme pour les échantillons de l'Isle-Verte, la fraction argileuse composée majoritairement de farine de roche fait en sorte que les valeurs soient si faibles. Davantage de mesures seraient également nécessaires pour conclure sur une quelquonque tendance.

#### 5.5.6 Pourcentage de carbonates total (Analyse thermogravimétrique)

L'Annexe B7 - 8 présente les résultats obtenus suite à l'analyse thermogravimétrique (ATG) sur les échantillons du site de Notre-Dame-des-Neiges. Il est possible de constater que les pourcentages de carbonates de l'unité intermédiaire/supérieure et de l'unité inférieure sont assez semblables avec des valeurs respectives de 7,0  $\pm$  0,2 % et 7,9  $\pm$  0,2 %. Bien entendu, ces résultats proviennent de l'analyse d'un seul échantillon par unité et davantage de résultats seraient nécessaires afin de stipuler sur l'exactitude de cette tendance. Les Annexes B7 - 9 et B7 - 10 présentent les courbes de perte de masse en fonction de la température utilisées pour déterminer les pourcentages de carbonates.

#### 5.5.7 Pourcentage de carbonates total (Chittick)

L'Annexe B7 - 11 présente les résultats obtenus suite à l'essai Chittick pour la détermination du pourcentage de carbonates total dans chacune des unités de sol. Les valeurs obtenues sont de  $8,1 \pm 0,3$  % pour l'unité intermédiaire/supérieure et de  $6,5 \pm 0,3$  % pour l'unité inférieure. Ces valeurs sont très proches pour les deux unités. Contrairement aux échantillons de l'Isle-Verte, ici l'unité inférieure semble légèrement moins riche en carbonates total. Les résultats des deux différents essais sont inverses. L'analyse thermogravimétrique indique que le pourcentage de carbonates total le plus élevé est associé à l'unité inférieure, tandis que la méthode Chittick indique que c'est l'unité supérieure/intermédiaire qui possède le pourcentage de carbonates total le plus élevé.

## 5.6 Caractérisation mécanique (terrain)

Cette section porte sur les résultats des différents essais de terrain reliés aux caractéristiques mécaniques des sols.

#### 5.6.1 Essai de pénétration standard (SPT)

Un essai SPT avec l'utilisation de l'analyseur de battage a été réalisé dans le forage FZ-05. Le profil de synthèse montre le profil d'indices N bruts obtenus, en plus des indices N obtenus dans les autres forages F1, C1-1 et C1-2. Dans ce dernier cas, il s'agit d'indice N brut, car il y a un manque d'information relativement à l'énergie transmise lors des essais. Il est toutefois possible de corriger les indices N obtenus dans le forage FZ-05 grâce à l'utilisation de l'analyseur de battage et des autres facteurs de correction tels que décrient à la section 3.1.6. Les valeurs d'indices N varient environ entre 15 et 41 pour l'unité supérieure et diminuent graduellement dans l'unité intermédiaire avec des valeurs d'environ 30 et 15. Pour l'unité inférieure, les valeurs varient etre 0 et 17, en fonction de l'essai, et ne présente aucune tendance apparente. L'essai SPT réalisé au forage F1 donne des indices N de 0 ou 1, tandis que l'essai SPT au forage FZ-05 montre des

indices N plus élevés, entre 6 et 17. Le profil d'indices N permet d'avoir une bonne idée de la répartition des différentes unités dans la colonne de sol. L'essai SPT dans le forage FZ-05 présente tout de même des valeurs élevées dans l'unité inférieure, mais ceci concorde avec les profils de résistance au cisaillement non drainé obtenue au scissomètre de chantier (C1-1 et C1-2, Figure 5 - 2) qui montrent aussi des valeurs élevées.

#### 5.6.2 Essais scissométriques

Aucun profil scissométrique n'a été fait lors de la campagne 2014. Toutefois, un profil a été réalisé dans le forage F2 en 2006 et deux profils ont été effectués dans les deux forages C1-1 et C1-2 en 2012. Les deux derniers profils scissométriques sont présentés sur le profil de synthèse à la Figure 5 - 2. Il est possible d'observer qu'ils s'accordent très bien et que la valeur moyenne de résistance au cisaillement non drainé est d'environ 120 kPa. Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé augmentent légèrement avec la profondeur et montrent peu de dispersion. Tout comme à l'Isle-Verte, il n'est pas possible de réaliser d'essais scissométriques dans l'unité supérieure, étant donné la consistance très raide du silt argileux.

#### 5.6.3 Essais au piézocône et au piézocône sismique

Pour le site de Notre-Dame-des-Neiges, différents problèmes avec l'essai au piézocône sismique, dont des bris de foreuse et le manque de temps, ont fait en sorte que le piézocône sismique effectué par Qualitas en 2013 et le piézocône CPTu1 effectué par le MTMDET en 2008 sont utilisés pour l'analyse géotechnique du site. Le pizéocône réalisé par Qualitas est nommé CM-05 pour garder une cohérence dans la dénomination. Le piézozône sismique incomplet CM-04 est présenté dans cette section, même s'il n'est pas directement utilisé dans l'analyse.

Le piézocône sismique CM-04 a été tenté un peu plus à l'ouest que le terrain d'étude et il est présenté à l'Annexe B3 - 3. Ce piézocône n'a pas été arpenté, et donc, l'utilisation du relevé LiDAR et de la grille d'élévation permet de définir l'élévation à 87,17 mètres. Une profondeur de 20 mètres a été atteinte lors du sondage. L'essai a débuté à une profondeur de 6 mètres, ces 6 mètres étant constitués de matériaux granulaires. Il y a tout d'abord la continuité de ces mêmes matériaux granulaires, sur 4 mètres et ce, jusqu'à la profondeur de 10 mètres. Par la suite, il y a une unité de 3,5 mètres qui semble présenter des caractéristiques d'un sol cohérent, avec le développement de pression interstitielle importante et d'une résistance en pointe entre 1 500 et 2 500 kPa. Cette unité se divise en deux couches distinctes. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement moyenne est de 273 m/s. Aucune investigation n'a été fait pour caractériser cette couche de sol cohérent, qui n'est pas retrouvée au site principal, et qui ne se trouve qu'à 200 mètres plus à l'est. Le sommet de l'unité supérieure est atteint à la profondeur de 13,5 mètres, soit à une élévation de 73,67 mètres. La résistance en pointe oscille entre 5 000 et 6 000 kPa, avec le développement de pression interstitielle qui augmente régulièrement avec la profondeur. Le rapport B<sub>a</sub> augmente également jusqu'à une valeur d'environ 0.2, à 20 mètres de profondeur, profondeur à laguelle le bris de la foreuse a forcé l'arrêt du sondage. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement moyenne est de 368 m/s.

Le piézocône sismique CM-05 (Annexe B3 - 5) a été réalisé en 2013 par l'équipe de Qualitas. L'unité supérieure est surmontée par du sable et du silt sableux, et donc, le sommet de l'unité se trouve à environ 76 m d'élévation. Elle est caractérisée par des valeurs de résistance en pointe élevée (qt d'environ 3 000 kPa), un frottement important (fs d'environ 140 kPa) et un rapport Bq faible près de 0. La résistance diminue ensuite graduellement dans l'unité intermédiaire pour atteindre une valeur assez constante de résistance en pointe d'environ 2 000 kPa au début de l'unité inférieure. Le rapport Bq augmente graduellement dans l'unité intermédiaire pour atteindre une valeur d'environ 0,7. Le rapport Bq dans l'unité inférieure varie entre 0,8 et un peu plus de 1,0. Le rapport Bq donne une bonne indication de la séparation des trois unités de sol.

Le choix du paramètre  $N_{kT}$  pour le site de Notre-Dame-des-Neiges est plus difficile. Plusieurs essais ont été réalisés lors des différentes campagnes de caractérisation géotechnique. Tout d'abord, un piézocône a été réalisé au forage F1, soit le CPTu1, lors de la première campagne de 2008. Aucun essai scissométrique n'a été réalisé au niveau de ce forage. Un deuxième piézocône a été fait au niveau du forage F2, soit le CPTu2, en plus d'un essai au scissomètre de chantier. Ce forage se situe dans le talus, à une élévation d'environ 60 mètres et n'est donc composée que de l'unité inférieure. Les données ne peuvent pas être utilisées pour déterminer le N<sub>kT</sub>, étant donné que l'unité inférieure dans le talus est surconsolidée par l'érosion des couches supérieures et le paramètre N<sub>kT</sub> déduit ne serait pas représentatif du dépôt complet. Ensuite, le piézocône sismique CM-05 a été réalisé, de même que des essais scissométriques dans les forages C1-1 et C1-2. Lorsque le profil de résistance du piézocône CPTu1 est utilisé afin de le caler sur les valeurs de résistance au cisaillement obtenues au scissomètre de chantier en C1-1 et C1-2, la valeur de NkT de 18 est obtenue. Par contre, lorsque le profil de résistance du piézocône sismique CM-05 est utilisé avec ces mêmes valeurs de Suv, la valeur du paramètre NkT est d'environ 12. Toutefois, comme il est possible de le constater sur le profil de synthèse (Figure 5 - 2), il semble y avoir un très mauvais accord entre le profil de σ'p déduit du piézocône sismique CM-05 et le profil de contrainte effective de ce site. Ceci laisse donc un doute sur la gualité du sondage CM-05 et il semble plus justifier d'utiliser un paramètre Nkt de 18. Il est alors possible d'obtenir des valeurs de résistance au cisaillement non drainé pour l'unité supérieure et l'unité intermédiaire. Pour l'unité supérieure, la résistance au cisaillement non drainé varie entre 160 et 200 kPa, en utilisant le profil CM-05. La résistance de l'unité intermédaire diminue graduellement jusqu'à une valeur d'environ 120 kPa, ce qui correspond à la valeur moyenne pour l'unité inférieure en utilisant le profil de CPTu1. Ce profil montre également que cette résistance augmente légèrement avec la profondeur.

La valeur de 3,4 a été utilisée pour le paramètre  $N_{\sigma T}$  afin d'obtenir un profil de contraintes de préconsolidation ( $\sigma'_p$ ). Celle-ci est tirée de Demers & Leroueil (2002), étant donné que les valeurs de  $\sigma'_p$  disponibles au site de Notre-Dame-des-Neiges ne permettent pas de stipuler sur une valeur précise. Cette valeur provient d'études sur les argiles légèrement surconsolidées de la mer de Champlain et non sur des silts argileux très durs et surconsolidés comme c'est le cas ici. Il est donc possible que cette valeur ne soit pas parfaitement adpatée. Encore une fois, la cohérence entre le profil de contraintes effectives et CPTu1 est excellente, ce qui n'est pas tout à fait le cas

avec CM-05. À partir du profil de contraintes effectives, il est possible d'observer que l'unité supérieure est surconsolidée, que l'unité intermédiaire est également surconsolidée, mais dans une moindre mesure, et que l'unité inférieure est à peu près normalement consolidée. Ceci concorde relativement bien avec les valeurs d'indices de liquidité qui sont plus élevés dans l'unité inférieure.

Le profil de vitesse des ondes de cisaillement dans le sol (V<sub>s</sub>) est visible à l'Annexe B3 - 5. Les valeurs de ce profil proviennent des mesures faites directement lors de la réalisation du CPTu. À partir de ce profil, il ne semble pas y avoir de différences marquées de V<sub>s</sub> entre les unités supérieure, intermédiaire et inférieure. Il est toutefois possible d'obtenir des V<sub>s</sub> à partir de relations empiriques. Les profils obtenus avec ces relations et la comparaison avec les mesures réelles sont discutés au Chapitre 7.

## 5.7 Caractérisation mécanique (laboratoire)

Cette section présente les résultats obtenus suite aux essais oedométriques et aux essais triaxiaux à partir des échantillons récupérés lors de la campagne d'échantillonnage de l'été 2014.

#### 5.7.1 Essais oedométriques

Au total pour cette campagne, 11 échantillons ont été soumis à des essais oedométriques, soit 5 échantillons provenant de l'unité supérieure, 4 échantillons de l'unité intermédiaire et 2 échantillons de l'unité inférieure. L'Annexe B4 contient les courbes oedométriques analysées provenant des trois échantillons récupérés dans les forages F1, F2 et C1-1 en 2008-2012, ainsi que celles obtenues suite à la campagne d'échantillonnage de 2014. Les essais oedométriques réalisés sur les échantillons récupérés donnent des courbes de compression typiques des sols possédant de faibles indices des vides naturels. Il est plutôt difficile de faire l'analyse de ces courbes et d'obtenir une valeur précise de pression de préconsolidation.

Lorsque cela s'est avéré possible, des essais oedométriques ont été réalisés sur deux échantillons se situant à la même élévation, mais qui ont été prélevés selon les deux méthodes d'échantillonnage, soit par tube de grand diamètre ou par carottage. La Figure 5 - 10 compare les essais CR1-B et S2-TM1 (élévation d'environ 72,65 m). Dans les deux cas, les courbes sont typiques des sols argileux à faibles indices des vides naturels, permettant difficilement la détermination de la contrainte de préconsolidation. L'échantillon prélevé par tube mince (S2-TM1) montre un indice des vides légèrement plus élevé et un indice de compression également plus élevé que l'échantillon prélevé par carottage (CR1-B). La cassure dans la courbe de compression de S2-TM1 est probablement due à un réajustement du sol et de l'anneau dans le montage. La Figure 5 - 11 compare les échantillons CR5-B et S3-TM2 prélevés à une élévation d'environ 69,70 m. L'allure des courbes est semblable, mais l'indice des vides de l'échantillon S3-TM2 est légèrement supérieur. La comparaison des essais oedométriques de CR8-A et S2-TM4 (élévation d'environ 65,20 m, Figure 5 - 12) présente les mêmes caractéristiques que la comparaison précédente. Finalement, la Figure 5 - 13 compare les échantillons du sommet de l'unité inférieure, CR13-A et S1-TM6 (élévation d'environ 59,40 m). Il semble que l'échantillon récupéré par tube de

grand diamètre montre une cassure relativement similaire que celle de l'échantillon S2-TM1, et qui est due à un réajustement du système plutôt qu'à un comportement mécanique différent de CR13-A. La pression de préconsolidation obtenue avec l'échantillon CR13-A est davantage en accord avec les profils de pression de préconsolidation déduits de CPTu1 et CM-05, tandis que celle de l'échantillon S1-TM6 est très faible. Les résultats montrent donc que le sol de l'unité supérieure est fortement surconsolidé et que celui de l'unité intermédiaire est également surconsolidé, mais dans une moindre mesure. Les résultats pour l'unité inférieure donnent des OCR plus faibles que 1, ce qui n'est pas possible, car le sol n'est assurément pas sous-consolidé.

Le Tableau 5 - 3 présente les valeurs d'indices de compression et de recompression pour les échantillons du site de Notre-Dame-des-Neiges. Les indices de recompression sont déterminés graphiquement avec la partie initiale de la pente. L'indice de recompression  $C_{s d-r}$  correspond à la pente de la ligne de déchargement final. Pour les trois unités, les valeurs moyennes sont les suivantes. Pour l'unité supérieure, l'indice de compression est de 0,14 et l'indice de recompression est de 0,04. Pour l'unité intermédiaire, l'indice de compression est de 0,11 et l'indice de recompression de 0,03. Pour l'unité inférieure, l'indice de compression est de 0,14 et l'indice de recompression de 0,03.

#### 5.7.2 Essais triaxiaux

Au total, 7 échantillons ont été soumis à des essais triaxiaux CIU. Ces échantillons sont répartis entre les différentes unités, soit : 4 échantillons dans l'unité supérieure, 1 échantillon dans l'unité intermédiaire et finalement, 2 échantillons au sommet de l'unité inférieure. Le Tableau 5 - 4 présente les contraintes de consolidation qui correspondent à la contrainte verticale effective des échantillons. Dans tous les cas, les échantillons sont cisaillés isotropiquement à une contrainte effective proche des contraintes en place, donc dans le domaine surconsolidé et les échantillons atteignent la rupture principalement par plan de cisaillement unique. La Figure 5 - 14 présente les 7 échantillons qui ont été testés, après séchage en étuve. Il n'y a que les échantillons S1-TM4 (unité intermédiaire) et CR13-B (unité inférieure) qui présentent une rupture en baril. Les angles  $\alpha$  sont de 57° pour CR1-B, 60° pour S1-TM1, 48° pour CR4-A, 55° pour CR6-B et 52° pour S2-TM6.

Les Figures 5 - 15 à 5 - 17 comparent les résultats des essais CIU pour les échantillons CR1-B et S1-TM1 qui proviennent d'une élévation d'environ 72,70 m, mais qui ont été récupérés par carottage et par tube de grand diamètre. Pour un pourcentage de déformation similaire, l'échantillon S1-TM1 montre une résistance beaucoup plus élevée. Les cheminents de contraintes montrent un comportement dilatant dans les deux cas, mais les deux cheminements ne convergent pas vers le même point.

Les Figures 5 - 18 à 5 - 20 comparent les résultats des essais CIU pour les échantillons CR13-B et S2-TM6 qui proviennent d'une élévation relativement semblable (environ 59,20 m), mais qui ont été récupérés par carottage et par tube de grand diamètre. Ils font partie du sommet de l'unité inférieure. L'échantillon CR13-B montre un comportement contrainte – déformation avec écrouissage, avec une résistance au cisaillement qui augmente avec la déformation croissante.

Toutefois, l'échantillon S2-TM6 atteint un plateau de résistance vers environ 2 %. Les cheminents de contraintes se ressemblent et montrent un comportement dilatant, mais tout comme pour les échantillons CR1-B et S1-TM1, les cheminements ne convergent pas vers un même point.

La Figure 5 - 21 présente le comportement contrainte – déformation de la totalité des essais CIU réalisés sur des échantillons du site de Notre-Dame-des-Neiges. Les essais présentent tous un comportement de type écrouissage et certains atteignent un plateau de résistance, dont S1-TM1 et S2-TM6.

Les cheminements de contraintes de tous les essais présentés à la Figure 5 - 22 montrent un comportement dilatant. Toutefois, les essais des échantillons S1-TM1 (13,92 m) et S2-TM6 (27,65 m) semblent erronés, avec des angles de frottement plus faibles et des cohésions très élevées. Il n'est pas si évident de tracer l'enveloppe de résistance pour obtenir les paramètres de résistance à des déformations d'environ 14 %. Il est tout de même possible d'obtenir un résultat tel que présenté à la Figure 5 - 22. À partir des données disponibles, il n'apparaît pas possible de définir des paramètres de résistance différents d'une unité à l'autre et donc, tous les essais sont regroupés sur le même graphique. Les cheminements de contraintes sont montrés en représentation de Lambe et les paramètres de l'enveloppe de résistance montrent plus de variabilité qu'au site de l'Isle-Verte. L'angle de frottement  $\phi$ ' varie entre 27° et 29,5° (à l'exception de S1-TM1, avec un  $\phi$ ' de 9°), tandis que la cohésion c' varie entre 11 et 43 kPa (avec deux exceptions qui atteignent des valeurs de 78 kPa (S1-TM1) et 101 kPa (S2-TM6)). Les paramètres représentatifs de résistance de l'enveloppe de résistance sont un angle de frottement  $\phi$ ' de 29° et une cohésion c' de 12 kPa.

La Figure 5 - 23 présente le profil des résistances au cisaillement non drainé obtenues à une déformation de 12,9 à 15,0 %, suite aux essais CIU après consolidation à des contraintes voisines des contraintes en place, donc dans le domaine surconsolidé. Pour l'unité supérieure, la résistance au cisaillement à des déformations de 13,6 à 15,0 % varie entre 132 et 335 kPa. Pour l'unité intermédiaire, le seul essai au sommet de l'unité donne une valeur de 409 kPa pour une déformation de 12,9 %. Pour l'unité inférieure, les valeurs varient entre 230 et 376 kPa, pour des déformations entre 13,1 et 13,6 %. Pour faire un parallèle entre les résistances, les valeurs obtenues sont supérieures aux valeurs de S<sub>u</sub> obtenus au piézocône et au scissomètre de chantier.

## 5.8 Caractérisation hydraulique

Des essais de perméabillité ont été réalisés sur quatre échantillons pendant la réalisation des essais oedométriques, soit deux échantillons dans l'unité supérieure, un échantillon dans l'unité intermédiaire et un échantillon dans l'unité inférieure. L'Annexe B6 - 9 présente le tableau des résultats obtenus et les Annexes B6 - 10 à B6 - 13 montrent les graphiques ayant permis d'obtenir la valeur de  $k_0$ . L'essai réalisé sur l'échantillon S2-TM1 de l'unité supérieure a été fait à charge constante, tandis que les autres essais ont été faits à charge variable, en fonction des montages et cellules oedométrique disponibles. Les valeurs de conductivité hydraulique  $k_0$  à l'indice des vides naturel sont de 1,4x10<sup>-9</sup> m/s et de 8,5x10<sup>-10</sup> m/s pour l'unité supérieure, de 1,5x10<sup>-10</sup> m/s pour

l'unité intermédiaire et de 2,4x10<sup>-10</sup> m/s pour l'unité inférieure. À partir de ces résultats, l'unité supérieure du site de Notre-Dame-des-Neiges possède une perméabilité plus grande que l'unité supérieure du site de l'Isle-Verte. Les valeurs de perméabilité des deux échantillons sont étonnement élevées et pourraient être due à des chemins préférentiels.

## 5.9 Synthèse des unités de sol de Notre-Dame-des-Neiges

#### 5.9.1 Unité supérieure

L'unité supérieure possède une épaisseur d'environ 11 m (entre 76 et 65 m d'élévation), est composée d'un silt argileux de couleur gris et est caractérisée par une consistance très raide à dure. Le poids volumique moyen est de 20,8 kN/m<sup>3</sup>. Des traces de sable et de graviers se trouvent dans l'ensemble de l'unité; les graviers atteignant jusqu'à quelques centimètres de diamètre. La tomodensitométrie montre que la matrice du sol de cette unité est homogène et ne possède pas de laminations, et que les graviers sont dispersés aléatoirement dans le sol, ne formant pas d'horizons spécifiques. Les différents essais minéralogiques ont été faits sur l'échantillon CR8-A qui se trouve approximativement à l'interface entre l'unité supérieure et l'unité intermédiaire. Donc les résultats des essais minéralogiques sont décrits dans la section de l'unité intermédiaire. La salinité, mesurée à une élévation de 72,60 m, est de 1,5 g/l. Cette unité est caractérisée par des teneurs en eau faibles, entre 18 et 24 %. Les limites de plasticité sont assez constantes, avec des valeurs entre 16 et 20 %, tandis que les limites de liquidité varient entre 30 et 46 %. En fait, les limites de liquidité dans la moitié supérieure de l'unité varient entre 40 et 46 %, tandis que pour la moitié inférieure, les limites de liquidité sont d'environ 30 à 32 %. L'indice de plasticité est donc d'environ 25 % pour la moitié supérieure et varie entre 12 et 17 % pour la moitié inférieure. Les indices de liguidité sont faibles, avec des valeurs entre 0 et 0,3. Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'essai de pénétration standard donne des valeurs d'indices N qui varient entre environ 15 et 41 dans cette unité. Le scissomètre de chantier ne peut pas être utilisé dans cette couche. Les essais triaxiaux CIU donnent des valeurs de résistance à des déformations entre 13.6 et 15.0 % entre 130 et 330 kPa et montrent un comportement dilatant. Les pressions de préconsolidation obtenues à partir des essais oedométriques sont assez variables, notamment dû à la difficulté de l'analyse de la courbe. Toutefois, elles concordent relativement bien avec celles déduites du piézocône sismique CM-05 et montrent que l'unité supérieure est très surconsolidée, avec des valeurs d'OCR qui varient approximativement entre 9 et 2,5 en fonction de la profondeur. Ces essais eodométriques montrent également que les indices de compression sont faibles, avec des valeurs entre 0,11 et 0,18 et des indices de recompression qui varient entre 0,03 et 0,06. Les essais de perméabilité ont permis de déterminer une perméabilité  $k_0$  de 1,4x10<sup>-9</sup> m/s et de 8,5x10<sup>-1</sup> <sup>10</sup> m/s.

## 5.9.2 Unité intermédiaire

L'unité intermédiaire est plutôt difficile à positionner et le piézocône sismique CM-05 est l'outil privilégié à cette fin. Dans ce cas, elle possède une épaisseur d'environ 3 m, entre 65 et 62 m d'élévation, est composée d'un silt argileux de couleur gris et est caractérisée par une consistance

très raide à raide. Le poids volumique moyen est de 21,7 kN/m<sup>3</sup>. Des traces de sable et de graviers se trouvent dans l'ensemble de l'unité. La tomodensitométrie montre que la matrice du sol de cette unité est également homogène et ne possède pas de laminations, et que les graviers sont dispersés aléatoirement dans le sol, ne formant pas d'horizons spécifiques. Il y a également des fissures de matières organiques sans orientation spécifique. La salinité, mesurée à une élévation de 63,95 m, est de 1,5 g/l. Cette unité est caractérisée par des limites d'Atterberg relativement semblables à la moitié inférieure de l'unité supérieure, soit des limites de plasticité d'environ 14 à 17 % et des limites de liquidité de 22 à 26 %. L'indice de plasticité varie donc entre 8 et 13 %. Les teneurs en eau sont d'environ 20 %. Les indices de liguidité varient donc également entre 0 et 0.3. Les différents essais minéralogiques ont notamment permis d'obtenir une surface spécifique de 20 m<sup>2</sup>/g, une capacité d'échange cationique de 4,3 meg/100g et un pourcentage de carbonates total de 8,1 %. Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'essai de pénétration standard donne des valeurs d'indices N qui diminuent graduellement d'environ 30 à 15. Ces valeurs varient en fonction du positionnement de l'unité intermédiaire, mais la caractéristique principale étant la diminution graduelle de la résistance du sol. Le scissomètre de chantier n'a pas été utilisé dans cette unité. Le seul essai triaxial CIU dans cette unité présente un comportement dilatant et possède une résistance à une déformation de 12,9 % d'environ 410 kPa. Les pressions de préconsolidation obtenues à partir des essais oedométriques concordent relativement bien avec celles déduites du profil CM-05. Le profil de pression de préconsolidation diminue graduellement jusqu'à l'atteinte dune valeur constante vers 62 m d'élévation. Les valeurs d'OCR diminuent donc approximativement entre 2,7 et 1. Ces essais oedométriques montrent des indices de compression aussi faibles que 0,08, jusqu'à des valeurs de 0,14, et des indices de recompression qui varient entre 0,02 et 0,04. L'essai de perméabilité à charge variable a permis de déterminer une perméabilité k<sub>0</sub> de 1,47x10<sup>-10</sup> m/s.

#### 5.9.3 Unité inférieure

L'unité inférieure possède une épaisseur d'environ 21 m, entre 62 et 41 m d'élévation, est composée d'un silt argileux à silt et argile de couleur gris et est caractérisée par une consistance ferme à raide. Le poids volumique moyen est de 21,4 kN/m<sup>3</sup>. L'épaisseur de l'unité varie en fonction du socle rocheux sous-jascent qui varie localement. Les différents forages utilisés pour ce projet montrent que le socle est atteint à des élévations entre 37 et 45 m. La tomodensitométrie permet de voir des laminations assez fines dans cette unité, ce qui la différencie de l'unité supérieure et intermédiaire. Ces laminations ne sont pas visibles à l'œil nu, mais certaines variations de couleurs peuvent l'être. Ces laminations font un angle approximatif de 15° avec l'horizontal. Les échantillons CR13-A et B présentent des variations de couches grises et de couches plus rosées. La salinité, mesurée à une élévation de 59,20 m, est de 3,8 g/l. Les limites de plasticité varient entre 18 et 21 % et les limites de liquidité entre 24 et 31 %. L'indice de plasticité supérieure, avec des valeurs qui augmentent de 18 à 30 % avec la profondeur, ce qui fait que les indices de liquidité varient approximativement entre 0,5 et 0,9. L'essai de diffraction des rayons X permet d'affirmer que les phases minéralogiques présentes dans cette unité sont les

mêmes que pour les unités supérieure et intermédiaire. Ces minéraux sont le quartz, les feldspaths, la calcite, la hornblende et des amphiboles, en plus de l'illite et la chlorite pour les minéraux des argiles. Les différents essais minéralogiques ont notamment permis d'obtenir une surface spécifique de 27 m<sup>2</sup>/g, une capacité d'échange cationique de 6 meg/100g et un pourcentage de carbonates total de 6,5 %. Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'essai de pénétration standard donne des valeurs d'indices N entre 0 et 17, sans aucune tendance apparente. L'essai SPT réalisé au forage F1 donne des indices N de 0 ou 1, tandis que l'essai SPT au forage FZ-05 montre des indices N plus élevés, entre 6 et 17. Les deux profils scissométriques présentent des valeurs constantes de résistance au cisaillement non drainé d'environ 120 kPa. L'essai triaxial fournit des valeurs supplémentaires de résistance au cisaillement non drainé. Les deux essais triaxiaux CIU dans cette unité donnent une résistance à des déformations de 13.1 à 13,6 % très différente, l'une de 230 kPa et l'autre de 375 kPa, malgré que les deux échantillons proviennent du même horizon. Les deux échantillons (CR13-B et S2-TM6) montrent un comportement dilatant. La pression de préconsolidation obtenue à partir de l'essai oedométrique est légèrement plus faible que le profil de contraintes effectives, ce qui ressemble aux résultats de la campagne de 2008, et qui est probablement dû à la difficulté de l'analyse des courbes de compression. Le profil de  $\sigma'_{p}$  au piézocône CPTu1 indique que l'unité inférieure est normalement consolidée. L'accord entre le piézocône CPTu1 et le profil de contraintes effectives est excellent (avec un N<sub> $\sigma$ T</sub> de 3.4), mais ce n'est pas tout à fait le cas avec le piézocône sismigue CM-05 gui montre un profil de pression de préconsolidation plus faible que le profil de contraintes effectives. Il n'est pas possible que ce sol soit sous-consolidé. Les essais oedométriques montrent que les indices de compression sont faibles, avec des valeurs de 0,13 et 0,15 et des indices de recompression de 0,04 et 0,02. L'essai de perméabilité à charge variable a permis de déterminer une perméabilité k<sub>0</sub> de 2,37x10<sup>-10</sup> m/s.

## Tableaux

Campagne	Échantillonnage	Essais SPT	Essais pressiométriques	Piézométrie	Essais scissométriques	Piézocône	Piézocône sismique
MTMDET 2008	х	Х		Х	х	Х	
MTMDET - Qualitas 2012-2013	х	Х		Х	х		Х
MTMDET - ULAVAL 2014	Х	Х		Х			Х

Tableau 5 - 1 : Synthèse des essais de terrain pour le site de Notre-Dame-des-Neiges en fonction des différentes campagnes géotechniques

Tableau 5 - 2 : Synthèse des essais de laboratoire pour le site de Notre-Dame-des-Neiges en fonction des différentes campagnes géotechniques

Campagne	Essai de base	Granulométrie	Tomodensitométrie	Datation	Salinité	Essais de caractérisation minéralogique	Essais oedométriques	Essais de perméabilité	Essais triaxiaux CIU
MTMDET 2008	x	х					х		
MTMDET - Qualitas 2012-2013	X	х							Х
MTMDET - ULAVAL 2014	X	х	X	х	х	Х	х	Х	Х

<b>Fableau 5 - 3 : Présentation des indices de com</b>	pression et de recompression	pour le site de Notre-Dame-des-Neig	ges à partir des essais oedométriques

Échantillon	Élévation (m)	Unité	e <sub>0</sub>	σ' <sub>p</sub>	σ' <sub>v0</sub>	C <sub>c</sub>	C <sub>s</sub>	C <sub>s d-r</sub>
CR1-B	72.86		0.54	790	219	0.16	0.03	0.04
S2-TM1	72.66		0.61	480	224	0.18	0.06	0.07
CR5-B	69.74	Supérieure	0.49	800	290	0.12	0.04	0.04
S3-TM2	69.65		0.56	1500	292	0.16	0.05	0.05
S1-TM3	68.29		0.55	600	323	0.11	0.04	0.04
S2-TM4	65.28		0.50	1100	391	0.14	0.03	0.04
CR8-A	65.20	Intermédiaire	0.44	900	393	0.08	0.04	0.04
CR10-B	63.83		0.50	700	424	0.11	0.04	0.04
CR11-A	62.20		0.48	700	461	0.11	0.02	0.02
CR13-A	59.64	Infóriouro	0.60	425	507	0.15	0.04	0.05
S1-TM6	59.27	interleure	0.56	130	513	0.13	0.02	0.05

Tableau 5 - 4 :  $\sigma'_{v0}$  correspondant à la contrainte de consolidation pour les essais triaxiaux, avec  $\sigma'_p$  déduit du profil de piézocône CM-05

Échantillon	Élévation (m)	Unité	e <sub>o</sub>	σ' <sub>ν0</sub> (kPa)	σ' <sub>p</sub> (kPa)
S1-TM1	72.70		0.59	176	914
CR1-B	72.71	Supáriouro	0.50	175	1003
CR4-A	70.55	Superieure	0.60	228	921
CR6-B	68.86		0.57	310	1012
S1-TM4	65.34	Intermédiaire	0.55	354	1011
CR13-B	59.44	Infáriouro	0.61	464	619
S2-TM6	58.99	interteure	0.50	473	562

# Figures



Système de coordonnées: Lat/Long, Degrés, -180 ==> +180 Datum: NAD 83 Échelle 1:4 000

Carte réalisée par: Kevin Hébert LIDAR 2013 - Provenance MTMDET





Figure 5 - 2 : Profil de synthèse pour le site de Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 3 : CT-SCAN TM-01 – unité supérieure



Figure 5 - 4 : CT-SCAN TM-05 – unité intermédiaire



Figure 5 - 5 : CT-SCAN TM-06 – unité inférieure



Figure 5 - 6 : Résultats de l'essai de porosimétrie au mercure pour le site de Notre-Dame-des-Neiges

Notre-Dame-des-Neiges - S1-TM3



Figure 5 - 7 : Images du MEB de l'échantillon S1-TM3 de l'unité supérieure du site de Notre-Dame-des-Neiges

## Notre-Dame-des-Neiges - S1-TM6



Figure 5 - 8 : Images du MEB de l'échantillon S1-TM6 de l'unité inférieure du site de Notre-Dame-des-Neiges

Notre-Dame-des-Neiges - S1-TM6



Figure 5 - 9 : Deuxième série d'images du MEB de l'échantillon S1-TM6 de l'unité inférieure du site de Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 10 : Comparaison des essais oedométriques CR1-B et S2-TM1 (élévation d'environ 72,65 m)



Figure 5 - 11 : Comparaison des essais oedométriques CR5-B et S3-TM2 (élévation d'environ 69,70 m)



Figure 5 - 12 : Comparaison des essais oedométriques CR8-A et S2-TM4 (élévation d'environ 65,20 m)



Figure 5 - 13 : Comparaison des essais oedométriques CR13-A et S1-TM6 (élévation d'environ 59,40 m)


Figure 5 - 14 : Photo des échantillons cisaillés au triaxial suite au passage à l'étuve



Figure 5 - 15 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – S1-TM1 et CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 16 : Comparaison des variations de pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – S1-TM1 et CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 17 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) – S1-TM1 et CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 18 : Comparaison du comportement contrainte – déformation – CR13-B et S2-TM6 – Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 19 : Comparaison des variations de pressions interstitielles durant l'essai triaxial CIU – S2-TM6 et CR13-B – Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 20 : Comparaison des cheminements de contraintes (Lambe) – CR13-B et S2-TM6 – Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 21 : Comportements contrainte – déformation de tous les essais CIU réalisés sur les échantillons du site de Notre-Dame-des-Neiges



Figure 5 - 22 : Analyse des essais triaxiaux CIU pour le site de Notre-Dame-des-Neiges après consolidation près de la contrainte effective moyenne en place



Figure 5 - 23 : Profil des résistances au cisaillement non drainé obtenues à la suite des essais triaxiaux CIU après consolidation à des contraintes voisines des contraintes en place au site de Notre-Dame-des-Neiges

## Chapitre 6 Géologie régionale des dépôts argileux

#### 6.1 Analyse spatiale des dépôts

Ce chapitre a pour but de donner des informations quant à l'étendue de l'anomalie stratigraphique retrouvée dans le secteur Isle-Verte – Trois-Pistoles. À cette fin, l'ensemble de la banque de données des forages du MTMDET a été analysée. La Figure 6 - 1 est une carte qui présente la plupart des sites où des forages ont été effectués par le MTMDET dans la région du Bas-Saint-Laurent. Seulement les sites ayant été assez investigués et où l'anomalie stratigraphique semble être présente sont indiqués par les points mauves. Dans ce cas, il n'y a que le site de St-Anaclet, tout près de Rimouski, qui présente probablement assez d'information géotechnique pour faire une telle affirmation, mis à part les deux sites d'étude de ce projet de recherche. Les différents forages et sondages effectués par le MTMDET dans la région du Bas-Saint-Laurent ont été effectués dans le cadre de divers contrats et non pas dans le but d'obtenir des informations particulières sur cette anomalie. C'est pourquoi il est fort possible que l'anomalie se retrouve à d'autres endroits dans la région du Bas-Saint-Laurent, mais que ceux-ci n'ont jamais été investigués, dû à un besoin inexistant à ce moment. L'Annexe D présente des informations sur certains des sites montrés sur la Figure 6 - 1. Celles-ci indiquent des points importants concernant l'étendue possible de l'anomalie stratigraphique.

Le site de Trois-Pistoles montre une démarcation franche entre les unités supérieure et intermédiaire. L'Annexe C présente deux profils de piézocône (c62006b et c62007b) caractéristiques de cette anomalie. Le profil c62007b montre une diminution graduelle qui ressemble davantage à ce qui est retrouvé aux sites de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges. Au piézocône c62006b, le sommet de l'unité inférieure se trouve à une élévation similaire qu'à l'Isle-Verte, soit au niveau de la mer. Au piézocône c62007b, le sommet de l'unité inférieure semble se trouver à une élévation d'environ 6 m, ce qui est plus élevé qu'à l'Isle-Verte. Il est aussi possible que le piézocône c62006b ait été réalisé dans un ancien glissement de terrain, et donc que la partie supérieure soit en fait constituée de débris et que la partie inférieure soit constituée de sol intact (hypothèse formulée par Denis Demers). Il faudrait toutefois obtenir davantage de données pour confirmer cette hypothèse. La résistance en pointe corrigée dans l'unité inférieure pour ces deux forages correspond à la résistance en pointe corrigée obtenue sur le site de l'Isle-Verte. Un rapide calcul en supposant un N<sub> $\sigma$ T</sub> de 3,4 indique un OCR d'environ 1,0 aux deux sites de Trois-Pistoles (c62006b et c62007b), donc une unité inférieure qui serait à peu près normalement consolidée, et qui n'aurait donc pas été surchargée par des glaciers.

L'Annexe D - 6 présente le profil géotechnique à partir du forage F4 au site de St-Anaclet. L'unité supérieure présente des indices de liquidité très faibles d'environ 0 à 0,3. À partir du contact avec l'unité inférieure, les indices de liquidité sont beaucoup plus élevés, avec des valeurs entre 0,7 et 0,9. C'est également ce qui est retrouvé aux deux sites d'étude de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-

des-Neiges. La granulométrie est un peu plus fine au site de St-Anaclet, où l'unité inférieure présente des pourcentages de fraction argileuse d'environ 60 %. La résistance au cisaillement non drainé de l'unité inférieure est plus faible, avec des valeurs d'environ 25 à 40 kPa et montre une légère augmentation avec la profondeur. Il ne semble également pas y avoir de zone de transition entre les unités supérieure et inférieure. Les trois valeurs de  $\sigma'_p$  qui ont été obtenues au sommet de l'unité inférieure indiquent un OCR d'environ 1,3, tout comme au site de l'Isle-Verte.

Évidemment, afin de pouvoir dresser un portrait précis de la présence de ces sols très raides à durs dans la région du Bas-Saint-Laurent, beaucoup de travaux de terrain supplémentaires seraient à accomplir, dont notamment des essais au piézocône et piézocône sismique.

#### 6.2 Déglaciation wisconsinienne et hypothèse de la mise en place des dépôts

Plusieurs chercheurs, dont Locat (1976, 1977, 1978), Dionne (1977, 1995, 2002), Rappol (1993) et Hétu (1998), ont effectués des travaux dans la région du Bas-Saint-Laurent afin d'y améliorer les connaissances sur divers aspects géologiques, dont entre autres, la compréhension des différents milieux de sédimentation, le mouvement des masses glaciaires lors de la dernière déglaciation ainsi que les propriétés géotechniques des dépôts formés. Cette section tente d'éclaircir le sujet de la mise en place des dépôts retrouvés aux sites de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges à partir des informations disponibles sur la géomorphologie de la région ainsi que de leurs propriétés géotechniques de travaux seraient à prévoir afin de mieux cerner cette anomalie et donc, les idées présentées ici ne sont qu'hypothèses.

Avec le retrait de la calotte glaciaire laurentidienne lors de la dernière déglaciation wisconsinienne, la mer de Goldthwait a commencé à envahir le golfe du Saint-Laurent. S'en suit donc la submersion graduelle des côtes du Saint-Laurent par l'ouverture d'un bras de mer et d'une baie de vêlage. L'invasion marine de la mer de Goldthwait entre la région de Gaspé et Trois-Pistoles a été très rapide, malgré la distance de 400 km qui les sépare. En se basant sur les différentes datations sur coquilles, Hétu (1998) indique que cette invasion serait pratiquement synchrone et que le début de celle-ci s'est produit approximativement entre 14 000 et 12 000 ans B.P., et plus particulièrement vers 13 400 ans B.P. dans la région de Rimouski. Locat (1976) a défini que l'histoire géologique du secteur Baie-des-Sables - Trois-Pistoles se divise en quatre phases, dont la phase glacio-marine qui s'est produite approximativement entre 14 000 et 12 000 ans B.P. De plus, Rappol (1993) place la phase initiale de la mer de Goldthwait entre 13 800 et 13 400 ans B.P. La Figure 6 - 2 présente une synthèse des travaux réalisés dans la région et montrent les fronts de glace approximatifs lors de la dernière déglaciation pour l'est du Canada (Occhietti et al., 2011). Dionne (1977) affirme également que le secteur de Trois-Pistoles était libre de glace entre 13 500 et 12 000 ans B.P., ce qui correspond à la période du Goldthwaitien I. Cette période correspond à une phase glacio-marine durant laquelle la mer a talonné la marge glaciaire qui retraitait vers l'ouest. L'avancée de la mer de Goldthwait vers l'ouest fut alors bloquée par l'inlandsis, ce qui est démontré par la présence de la moraine de Saint-Antonin (Dionne, 1977). Locat (1978) a associé des dépôts de sédiments d'eaux profondes de la mer de Goldthwait aux différentes périodes. La

période du Goldthwaitien I correspond à la déposition de l'argile glacio-marine, une argile grise provenant d'une eau froide et saline et où aucun macrofossile n'y a été observé. Celle-ci est surmontée par une argile massive (Goldthwaitien II), ne possédant pas de stratifications et dont la présence de lentilles de sable allant jusqu'à 3 m d'épaisseur a été observée. La fréquence et l'épaisseur des lentilles augmentent d'est en ouest. Cette argile massive peut reposer sur l'argile glacio-marine ou directement sur le roc. La présence de lentilles de sable et gravier laisse présumer qu'il y avait une masse de glace, possiblement semi-flottante, qui permettait le transport de ce type de matériau. En effet, si le niveau marin se retrouve à une grande élévation lors de la sédimentation des sols argileux, il n'est pas probable que des matériaux plus grossiers s'y retrouvent, à moins d'une aide au transport, telle que des courants sous un glacier flottant (Locat, communication personnelle). Dans la région de Trois-Pistoles, l'argile de Trois-Pistoles joue un rôle de transition entre ces deux dépôts argileux. Les Figures 6 - 3 et 6 - 4 sont tirées de Locat (1978) et montrent les corrélations entre les différentes unités stratigraphiques pour la région de Baie-des-Sables – Trois-Pistoles. La Figure 6 - 3 est un schéma perpendiculaire au fleuve Saint-Laurent, tandis que la Figure 6 - 4 est un schéma parallèle au fleuve. À partir des travaux de tous ces différents auteurs, l'âge approximatif de 13 000 ± 500 ans B.P. semble bien ancré quant à la définition de la période de déglaciation du Bas-Saint-Laurent. La Figure 6 - 5 présente la courbe généralisée du niveau marin relatif la plus récente pour la région de Rivière-du-Loup et réalisée par Dionne (2002). Les informations connues permettent de situer la limite maximale atteinte par la Mer de Goldthwait dans la région de Rivière-du-Loup à un maximum d'environ 145 m, lors de la déglaciation wisconsinienne de la côte, il y a environ 12 600 ans B.P. Par contre, le manque d'indices valables au-dessus du niveau 135 m fait en sorte que le niveau atteint par la mer de Goldthwait se situe probablement plus entre 135 et 140 m (Dionne, 2002).

Bien que les unités stratigraphiques du secteur d'étude semblent corréler avec les unités stratigraphiques décrites par Locat (1978), il y a toujours une incertitude quant à la mise en place de ces unités et de leurs propriétés. Hétu (1998) montre qu'il y a eu une réavancée glaciaire dans la région de Rimouski entre 12 400 et 12 000 ans B.P., suite à la séparation de la masse de glace appalachienne par rapport à la calotte glaciaire laurentidienne. La calotte apalachienne avait possiblement un comportement qui se rapprochait du type alpin et la réavancée était probablement influencée par la topographie locale. Cette réavancée s'est possiblement effectuée sous la forme de lobes glaciaires (Locat, communication personnelle). Ceci pourrait possiblement expliquer le fait que l'anomalie stratigraphique ne semble pas se retrouver partout dans la région. Il y a également une différence importante de texture entre les unités supérieure/intermédiaire et inférieure, tel qu'il est possible de le voir grâce à la tomodensitométrie (Annexes A1 (Isle-Verte) et B1 (Notre-Damedes-Neiges). Les laminations, qui ne sont pas présentes dans les unités supérieure et intermédiaire, peuvent être un signe du remaniement d'une grande quantité de sol par les glaciers. Une réavancée glaciaire aurait pu faire en sorte de déplacer une masse argileuse (argile massive unités supérieure et intermédiaire) par-dessus les sédiments fins déjà présents (argile glaciomarine – unité inférieure). La masse glaciaire a probablement gelé les sols argileux sur une certaine épaisseur avant et pendant la réavancée glaciaire. Le gel pourrait également expliquer la

diminution graduelle de résistance et l'augmentation des indices de liquidité de l'unité intermédiaire. Le front de gel aurait pénétré une partie de la masse de sol argileux transportée, correspondant à l'unité supérieure. Le sommet de l'unité intermédiaire correspondrait à l'endroit où l'effet du gel aurait commencé à diminuer graduellement. Par la suite, les sols auraient pu adhérer à la base de la masse glaciaire semi-flottante et y rester accrochés jusqu'au moment de leur délestage et ce, sur les sols argileux déjà présents à des élévations inférieures. Cette hypothèse est avancée, car l'unité inférieure est supposée comme à peu près normalement consolidée, et il serait donc impossible que la masse glaciaire ait directement appuyé sur le sol au moment du délestage. Dans le cas contraire, l'unité inférieure aurait alors été surconsolidée. De plus, cette hypothèse est soutenue par divers indices par rapport aux différentes propriétés géotechniques et au comportement mécanique des sols des unités supérieure et intermédiaire, notamment les indices de liquidité ainsi que le comportement dilatant en compression. L'effet du gel peut influencer l'indice de liquidité, mais pas au point d'atteindre des valeurs près de 0. Dans ce cas, l'effet combiné du gel et d'une surcharge pourrait l'expliquer. Ces indices seront discutés au Chapitre 7. Il s'agit évidemment d'une simple hypothèse et celle-ci demande davantage de travaux afin de clarifier ce scénario.

Sur l'échantillon qui provient de l'unité supérieure, l'âge obtenu est de 15 295  $\pm$  35 ans B.P., tandis que pour l'échantillon qui provient de la base de l'unité intermédiaire, l'âge obtenu est de 13 480 ± 30 ans B.P. L'âge du coquillage de l'unité supérieure est plus ancien que prévu. Des datations plus âgées que 13 800 ans B.P., mais pas plus de 14 200 ans B.P., ont été obtenues dans le Bas-Saint-Laurent et en Gaspésie (Hétu, 1998). Trois d'entre elles ont été réanalysées dans un autre laboratoire pour obtenir au final des dates plus récentes que 13 300 ans B.P. Dionne & Coll (1995) questionnent également les datations qui sont plus âgées que 13 900 ans B.P. Les datations plus âgées sont généralement exclues des analyses de niveau marin. La datation de 15 295  $\pm$  35 ans B.P. obtenue est beaucoup plus ancienne que les plus vieilles coquilles analysées, ce qui laisse croire que cette analyse peut être érronée. La coquille récupérée pour la datation était très fragile et de petite taille, ce qui a fait en sorte qu'il était très difficile de la séparer de la matrice argileuse dans laquelle elle se trouvait. Il est alors possible que l'échantillon contienne des poussières de carbonates d'origine plus ancienne qui auraient contribué à contaminer l'échantillon. Il suffit en effet d'une très petite fraction pour contaminer un échantillon d'une très petite taille comme celui analysé (Guillaume Labrecque - Michel Allard, communication personnelle). Il serait alors préférable d'obtenir un autre échantillon et de s'assurer de bien séparer la coquille de la matrice de sol. Il est plus raisonnable d'affirmer que la déglaciation dans le secteur Trois-Pistoles se soit passée entre 13 500 et 13 000 ans B.P. La première datation du site de l'Isle-Verte (13 480 ± 30 ans B.P.) correspond à cette période. Malheureusement, aucun coquillage n'a été trouvé dans les unités inférieures des deux sites, ne permettant ainsi aucune datation. Le fait qu'un coquillage de 13 480 ± 30 ans B.P. ait été trouvé dans l'argile massive recouvrant les argiles glacio-marines tend à confirmer l'hypothèse de Hétu (1998) d'une réavancée glaciaire (entre 12 400 et 12 000 ans B.P.) qui aurait ramené des argiles glacio-marines au-dessus d'autres argiles glacio-marines plus récentes.

### **Figures**







Figure 6 - 2 : Position des fronts de glace durant le retrait de la calotte glaciaire Wisconinienne (tirée d'Occhietti et al., 2011)



Figure 6 - 3 : Corrélations entre les unités stratigraphiques de la région Baie-des-Sables – Trois-Pistoles perpendiculairement à l'estuaire du Saint-Laurent (Locat, 1978)



Figure 6 - 4 : Corrélations entre les sédiments marins et les sédiments d'origine marine – Coupe parallèle à l'estuaire du Saint-Laurent (Locat, 1978)



Figure 6 - 5 : Courbe généralisée du niveau marin relatif ou de l'émersion des terres dans la région de Rivière-du-Loup basée sur les dates au <sup>14</sup>C disponibles (tirée de Dionne, 2002).

# Chapitre 7

## Propriétés caractéristiques des dépôts argileux

Ce chapitre se veut une discussion sur les différents résultats obtenus durant le projet de recherche, concernant les propriétés physiques, minéralogiques et mécaniques des sols. Les propriétés sont également comparées aux corrélations des argiles de la mer de Champlain provenant notamment de Leroueil et al. (1983) et Locat et al. (2003) afin de vérifier si les sols de la région du Bas-Saint-Laurent divergent ou non de ces corrélations.

#### 7.1 Discussion sur les résultats obtenus et corrélations

#### 7.1.1 Caractérisation physico-chimique

Les Figures 4 - 2 et 5 - 2 permettent de bien visualiser les différents profils granulométriques, de teneurs en eau, de limites d'Atterberg et de salinité pour chacun des deux sites. Les poids volumiques moyens présentés ici proviennent des différents essais de laboratoire effectués pour ce projet. Au site de l'Isle-Verte, l'unité supérieure a un poids volumique de 21,0 kN/m<sup>3</sup>, tandis que les poids volumiques des unités intermédiaire et inférieure sont de 20,1 et 19,3 kN/m<sup>3</sup>. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, l'unité supérieure a un poids volumique de 20,8 kN/m<sup>3</sup>, tandis que les poids volumiques des unités intermédiaire et inférieure sont de 21,7 et 21,3 kN/m<sup>3</sup>.

#### 7.1.1.1 Granulométrie

Au site de l'Isle-Verte, le pourcentage d'argile varie entre 34 et 53 % sur l'ensemble du dépôt et pourcentage moyen est de 45 %. Toutefois, ces données ne sont basées que sur une faible quantité d'analyses granulométriques et un profil complet nécessiterait davantage d'analyses. La majorité du dépôt de ce site est considéré comme un silt argileux. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, l'unité supérieure montre un pourcentage de fraction argileuse qui diminue assez graduellement de 66 à 33 % jusqu'à l'unité intermédiaire. Celle-ci présente une granulométrie plus grossière, avec une fraction argileuse entre 26 et 34 %. Le profil granulométrique de l'unité inférieure semble plus constant sur son ensemble, avec une fraction argileuse qui varie entre 33 et 57 %, avec une moyenne de 49 %. Les sols sont donc considérés comme un silt argileux à une argile et silt. Dans l'ensemble, il est donc possible d'affirmer que du point de vue granulométrique, les deux sites d'étude sont assez semblables, mais les différences observées peuvent donner des indications sur l'évolution des conditions de sédimentation du milieu.

#### 7.1.1.2 Salinité

Au site de l'Isle-Verte, l'échantillon CR2-A de l'unité supérieure (élévation de 19,59 m) a une salinité de 15,7 g/l. L'unité intermédiaire présente une salinité de 25,4 g/l pour l'échantillon S4-TM4 (élévation de 5,97 m) et l'unité inférieure possède une salinité de 28,6 g/l (élévation de -1,18 m) pour l'échantillon S2-TM6. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, l'échantillon S2-TM1 de l'unité supérieure (élévation de 72,60 m) a une salinité de 1,5 g/l, tout comme l'échantillon CR10-A de

l'unité intermédiaire (élévation de 63,95 m). L'unité inférieure possède une salinité de 3,8 g/l à une élévation de 59,20 m (échantillon S1-TM6). Dû à l'élévation, à la proximité d'un important talus et à la rivière Trois-Pistoles qui facilite les écoulements dans le massif, le site de Notre-Dame-des-Neiges a subi un lessivage plus important que le site de l'Isle-Verte.

#### 7.1.1.3 Limites d'Atterberg

Les teneurs en eau et limites d'Atterberg ont été mesurées à partir des retailles des différents essais oedométriques et triaxiaux, ainsi que sur du sol récupéré lors du détubage. De plus, plusieurs teneurs en eau ont été faites sur du sol récupéré sur les carottes directement à leur sortie du carottier. Pour les deux sites, les teneurs en eau sont très faibles, et tendent à augmenter légèrement avec la profondeur, particulièrement dans l'unité inférieure. Le site de l'Isle-Verte montre des indices de plasticité entre 19 et 25 %. Ces indices de plasticité sont plus élevés qu'au site de Notre-Dame-des-Neiges, où ceux-ci varient entre 12 et 17 % dans l'unité supérieure, entre 8 et 13 % dans l'unité intermédiaire et entre 7 et 10 % dans l'unité inférieure. Ceci semble être principalement dû au lessivage, puisque la salinité est de 1,5 à 3,8 g/l à Notre-Dame-des-Neiges et de 15,7 à 28,6 g/l à l'Isle-Verte, tel que mentionné ci-haut. Il y a toutefois une différence d'indice de plasticité entre la moitié supérieure et la moitié inférieure de l'unité supérieure à Notre-Dame-des-Neiges. En effet, la moitié supérieure montre des indices de plasticité de 25 %, tandis que la moitié inférieure montre plutôt des valeurs de l'ordre de 12 à 17 %. Le reste du dépôt montre des indices de plasticité relativement faibles, de l'ordre de 7 à 13 également. Ceci pourrait être dû à une oxydation de la partie supérieure du dépôt qui est très drainée.

Pour les sols des deux sites, l'indice de liquidité est pratiquement nul dans l'unité supérieure, augmente légèrement dans l'unité intermédiaire et augmente dans l'unité inférieure jusqu'à des valeurs d'enviroin 0,8. La teneur en eau est donc approximativement la même que la limite de plasticité dans les unités supérieures. Comme les unités supérieure et intermédiaire ont possiblement été influencées par le gel, il est alors logique que les indices de liquidité soient si faibles. En effet, le processus de consolidation dû aux cycles de gel-dégel diminue la teneur en eau et donc l'indice de liguidité (Leroueil et al., 1991). Houston & Mitchell (1969) ont suggéré une relation qui relie la résistance au cisaillement non drainé du sol remanié à l'indice de liquidité. Pour un sol dont l'indice de liquidité est de 1, donc avec une teneur en eau égale à sa limite de liquidité, la résistance au cisaillement non drainé du sol remanié est de 1,6 kPa. Également, Wroth & Wood (1978) ont défini que la limite de plasticité est la teneur en eau à laquelle la résistance au cisaillement non drainé est 100 fois plus grande que la résistance au cisaillement à la limite de liquidité. Comme la teneur en eau des sols des deux sites d'étude est approximativement à la limite de plasticité, il s'en suit que leur résistance au cisaillement non drainé (Cu, à l'essai de compression triaxial) théorique serait de 160 kPa. Les unités supérieures des deux sites montrent effectivement une résistance élevée qui se rapproche de cette valeur, pour des indices de liquidité près de 0 (Section 7.1.3 et Figures 7 - 6 et 7 - 7).

L'indice de plasticité en relation avec la limite de liquidité et le pourcentage de particules dont la granulométrie est inférieure à 2 µm a été examiné. Les Figures 7 - 1 et 7 - 2 présentent les résultats obtenus et montrent que ces propriétés du sol remanié sont dans les mêmes faisceaux que les argiles de l'est du Canada (Leroueil et al., 1983). Les échantillons de Notre-Dame-des-Neiges montrent une activité encore plus faible que 0,25, ce qui est principalement dû au lessivage des sols qui possèdent une salinité beaucoup plus faible qu'au site de l'Isle-Verte. L'effet de cette salinité est reflété dans les valeurs d'indices de plasticité qui sont faibles au site de Notre-Dame-des-Neiges. Les argiles des deux sites sont donc considérées inactives, ce qui est dû à la grande quantité de farine de roche dans la fraction argileuse des argiles de l'est du Canada.

#### 7.1.2 Caractérisation minéralogique

Les différents essais ayant été réalisés pour la caractérisation minéralogique sont la diffraction des rayons X, l'essai au bleu de méthylène pour la surface spécifique totale, l'essai pour la capacité d'échange cationique et l'analyse thermogravimétrique et la méthode Chittick pour le pourcentage de carbonates. Tous ces essais ont été effectués sur les mêmes échantillons. Pour l'Isle-Verte, il s'agit des échantillons CR4-A, S2-TM5 et S2-TM6, respectivement de l'unité supérieure à l'unité inférieure. Pour Notre-Dame-des-Neiges, il s'agit de l'échantillon CR8-A, qui se situe à la délimitation approximative entre l'unité supérieure et intermédiaire et de l'échantillon CR13-A de l'unité inférieure. Les échantillons de l'Isle-Verte qui ont été utilisés pour ces essais possèdent une fraction argileuse d'environ 48 %, tandis que la fraction argileuse pour les échantillons de Notre-Dame-des-Neiges est d'environ 34 %.

#### 7.1.2.1 Diffraction des rayons X

Seule la méthode de diffraction des rayons X a été utilisée dans ce projet pour identifier qualitativement les phases minérales présentes dans les échantillons. Globalement, les minéraux retrouvés dans les sols de ce projet de recherche sont les mêmes que pour les sols analysés par les différents chercheurs, tels que Quigley (1980), Locat et al. (1984) et Locat & St-Gelais (2013) pour les argiles de la mer de Champlain. Il s'agit principalement de quartz, de feldspaths, de calcite, d'amphiboles et de pyrite pour les minéraux primaires, en plus des phases argileuses qui sont constituées de chlorite et d'illite. Les Annexes A8 - 3 à A8 - 8 pour l'Isle-Verte et B7 - 1 à B7 -4 pour Notre-Dame-des-Neiges présentent les graphiques détaillés des résultats de ces analyses. Étant donné la position du côté sud du fleuve Saint-Laurent, un apport plus grand en minéraux provenant des roches des Appalaches est probable par rapport aux sols argileux du côté nord du fleuve Saint-Laurent. La source des amphiboles n'est probablement pas granitique, mais plutôt détritique. Elles proviennent probablement de minéraux d'altération des feldspaths tels que la trémolite ou l'actinolite. Selon Locat & St-Gelais (2013), le type d'amphibole retrouvé dans l'argile de Cap-Chat est l'actinolite. Il serait donc possible que ce soit la même chose pour les échantillons étudiés, en plus de la hornblende qui a été détectée par les analyses. Le haut degré de cristallisation des minéraux argileux, représenté par le faible bruit de fond des analyses, est expliqué par la proximité d'une abondante source de « vieilles argiles » provenant des Appalaches (Locat, 1978). La quantité de carbonates contenue dans les échantillons doit varier avec la position du dépôt. Locat (1978) a noté que la quantité de carbonates augmentait d'ouest en est, et que cela est dû au positionnement de la formation de roche calcaire de Sayabec, plus à l'est, qui en est la source principale.

#### 7.1.2.2 Porosimétrie au mercure et microscopie électronique à balayage

Les Figures 7 - 3 et 7 - 4 présentent respectivement une comparaison entre les résultats de l'essai de porosimétrie au mercure et les images recueillies au MEB, et ce pour chacun des deux sites. Au site de l'Isle-Verte, l'unité supérieure ne présente qu'une seule famille de pores d'environ 0,1  $\mu$ m de diamètre, ce qui est cohérent avec les images obtenues au MEB qui présentent une structure interne compacte et sans porosité apparente. Toutefois, l'unité inférieure est composée de deux familles de pores distinctes, soit une de 0,1  $\mu$ m et une d'environ 0,6 à 0,8  $\mu$ m. La présence de ces deux familles de pores se reflète également sur les images obtenues au MEB, car la structure interne observée est un peu plus ouverte, ce qui signifie qu'il s'agit d'un sol un peu plus compressible.

Au site de Notre-Dame-des-Neiges, il ne semble pas y avoir de différence entre les unités supérieure et inférieure en ce qui a trait aux familles d'ouverture de pores et à la structure interne observée au MEB. En effet, les résultats de l'essai de porosimétrie au mercure indiquent que les deux unités montrent une seule famille d'ouverture de pores d'un diamètre d'environ 0,2 µm. De plus, les images obtenues au MEB présentent une structure très compacte et fermée, sans porosité apparente.

Les argiles de la mer de Champlain montrent typiquement deux familles d'ouverture de pores, soit une micro-porosité (intra-aggrégats) d'environ 0,1 µm et une macro-porosité (inter-aggrégats) entre 1 et 3 µm. L'unité supérieure de l'Isle-Verte est donc composée uniquement de microporosité, tandis que l'unité inférieure possède également une macro-porosité, bien que celle-ci soit de petite dimension. À Notre-Dame-des-Neiges, cette macro-porosité n'est pas observée dans l'unité inférieure, qui possède les mêmes caractéristiques que l'unité supérieure. L'effet de la consolidation sur les pores donne des indications supplémentaires sur ces deux dépôts. Lorsqu'un sol compressible possédant des micro- et macro-pores est soumis à un chargement, les liens argileux qui forment la structure interne vont se briser au fur et à mesure de l'augmentation de l'application de la charge. Cela a pour effet de diminuer la taille des macro-pores jusqu'à atteindre un diamètre semblable aux micro-pores, ceux-ci n'étant peu ou pas affectés par le chargement. Ceci permet donc de dire que l'unité inférieure de l'Isle-Verte n'aurait pas nécessairement subie un grand chargement, gardant par le fait même ses macro-pores. À Notre-Dame-des-Neiges, la contrainte effective très élevée due au gradient hydraulique descendant fait en sorte que les macro-pores ne sont plus présents. La dimension des pores est également affectée par la teneur en eau. Dans ce cas-ci, les teneurs en eau sont faibles, ce qui correspond à des pores de petites dimensions et à une structure fermée.

#### 7.1.2.3 Surface spécifique totale et capacité d'échange cationique

Les résultats des essais de surface spécifique totale montrent que les valeurs obtenues au site de l'Isle-Verte (Annexe A8 - 9) sont légèrement supérieures à celles obtenues au site de Notre-Damedes-Neiges (Annexe B7 - 5). Par contre, les valeurs obtenues sur un même site pour les différentes unités ne sont pas très différentes, mise à part au site de l'Isle-Verte où la surface spécifique totale de l'unité supérieure semble légèrement supérieure à celles des deux autres unités. Il en est de même pour la capacité d'échange cationique, où les valeurs sont légèrement plus élevées au site de l'Isle-Verte qu'au site de Notre-Dame-des-Neiges. Les faibles valeurs de surface spécifique totale et de capacité d'échange cationique obtenues confirment que les minéraux argileux présents dans ces sols sont une combinaison de chlorite et d'illite, mais qu'il peut y avoir une différence quant à la quantité de farine de roche présente dans les échantillons. Des analyses quantitatives des phases minéralogiques permettraient de répondre à cette interrogation. La Figure 7 - 5 (modifiée de Locat et al, 2003) présente diverses relations entre l'indice de plasticité, la fraction argileuse, la capacité d'échange cationique et la surface spécifique totale. Il est à noter que pour deux échantillons du site de l'Isle-Verte (S2-TM5 et S2-TM6), l'analyse granulométrique n'a pas été faite directement sur l'échantillon, et donc les valeurs de pourcentage d'argile et d'activité proviennent de résultats sur d'autres échantillons sembables et à une élévation similaire. Comme le profil granulométrique est relativement constant sur l'ensemble du dépôt, ces résultats sont tout de même représentatifs. Il est possible de constater que les sols des deux sites s'insèrent relativement bien dans les relations qui incluent des sols argileux de partout dans le monde. Les principales différences des sols argileux de Notre-Dame-des-Neiges concernent leur salinité qui induit une plus faible plasticité. Dans ce cas-ci, la granulométrie des échantillons de Notre-Dame-des-Neiges est plus grossière que ceux de l'Isle-Verte. La Figure 7 - 6 présente la relation entre l'activité (Ac) des sols et la surface spécifique des argiles (Sc), modifiée de Locat et al. (2003). Il s'agit ici d'une valeur de surface spécifique normalisée par le pourcentage de minéraux argileux. La figure permet de situer les résultats par rapport à la « C-Line » ou « Clay line » (Locat et al., 2003). Cette relation a été obtenue pour diverses argiles dans le monde et quatre zones de minéraux argileux sont tracées sur le graphique. La relation implique que pour un sol d'une activité qui est égale à 0,5, la valeur de surface spécifique est de 100 meg/100g. Cela revient à la relation entre l'indice de plasticité (I<sub>p</sub>) et la surface spécifique totale (SSA) qui est présentée au graphique f) de la Figure 7 - 5, et qui est influencée par la salinité. Comme les minéraux argileux présents dans les sols de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges sont l'illite et la chlorite, ils devraient se situer dans la zone 2, tout comme pour les données obtenues sur les argiles du Québec qui proviennent de l'étude de St-Gelais (1990). Toutefois, les valeurs obtenues pour le site de l'Isle-Verte sont de 31 à 48 meg/100g pour la surface spécifique, pour des valeurs d'activité d'environ 0,49. Pour le site de Notre-Dame-des-Neiges, la surface spécifique varie entre 20 et 27 meg/100g pour des valeurs d'activité d'environ 0,19. Ces valeurs placent les sols argileux de Notre-Dame-des-Neiges dans la zone 1, qui indiquerait que la kaolinite domine l'illite et la chlorite pour la fraction argileuse. Comme la kaolinite n'a pas été détectée qualitativement avec l'essai de diffraction des rayons X, il n'est pas logique selon Locat et al. (2003) que ces sols se retrouvent dans cette zone. Les sols du site de l'Isle-Verte se retrouvent dans une zone

relativement semblable aux autres argiles du Québec qui font parties de l'étude de Locat et al. (2003). Il faut toutefois prendre en compte que cette relation et ses limites sont basées sur les caractéristiques des minéraux argileux purs et ne tiennent pas compte de la minéralogie plus complexe des sols naturels. Cette figure permet néanmoins d'avoir une idée approximative de la nature des sols qui sont à l'étude.

#### 7.1.2.4 Pourcentage de carbonates total

Il est possible de comparer le pourcentage de carbonates total obtenu par les essais Chittick et les analyses thermogravimétriques (ATG). Le Tableau 7 - 1 présente la comparaison des résultats. Bien que la méthode Chittick soit criticable, notamment par rapport à la différenciation du pourcentage de calcite et de dolomite (Locat & Bérubé, 1986), elle est néanmoins probablement plus fiable pour ce qui est du pourcentage de carbonates total que la méthode d'analyse thermogravimétrique, qui est une méthode indirecte. Il est difficile de se prononcer sur les différences en carbonates total entre les différentes unités, étant donné que les deux méthodes donnent des résultats inverses. Au site de l'Isle-Verte, la méthode ATG indique une quantité de carbonates plus grande pour l'unité supérieure, tandis qu'avec la méthode Chittick, c'est plutôt l'unité inférieure qui possède un pourcentage de carbonates plus élevé. Au site de Notre-Damedes-Neiges, la méthode ATG indigue une guantité de carbonates plus grande pour l'unité inférieure, tandis qu'avec la méthode Chittick, c'est plutôt l'unité intermédiaire/supérieure qui possède un pourcentage de carbonates plus élevé. Par contre, ces résultats permettent de bien situer ces sols du Bas-Saint-Laurent par rapport aux argiles de l'est du Canada en ce qui a trait au pourcentage de carbonates total. St-Gelais (1990) a effectué plusieurs analyses minéralogiques sur un total de 18 argiles réparties partout dans l'axe du fleuve Saint-Laurent. Le pourcentage de carbonates total varie entre 0 et 7 %, cette valeur maximale étant associée au site de Cap-Chat, qui se situe à l'est du Bas-Saint-Laurent, dans la région administrative de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine. Pour la plupart des sites, la valeur est d'environ 2 %. Il est donc possible d'affirmer que les sites de l'Isle-Verte, Notre-Dame-des-Neiges et de Cap-Chat présentent un pourcentage en carbonates total plus élevé que les autres sites au Québec et que ceci est dû à leur positionnement au niveau des Appalaches, avec la source de ces carbonates qui est probablement la formation de Sayabec plus à l'est, tel que mentionné ci-haut (Locat, 1978).

#### 7.1.3 Caractérisation mécanique

#### 7.1.3.1 Essai de pénétration standard

Vu l'utilisation quasi systématique de l'essai de pénétration standard lors d'une étude géotechnique, il paraît nécessaire de tenter de faire un lien entre cet essai et la résistance au cisaillement non drainé des sols. Le site de l'Isle-Verte présente des indices N bruts entre 9 et 37 pour l'unité supérieure. Les indices N diminuent graduellement dans l'unité intermédiaire pour ensuite atteindre des valeurs de 4 à 10 dans l'unité inférieure, et qui augmentent légèrement avec la profondeur (Figure 4 - 2). Le site de Notre-Dame-des-Neiges montre la même tendance, soit des indices N dans l'unité supérieure qui varient entre 15 et 41 et qui diminuent graduellement dans l'unité intermédiaire. Pour l'unité inférieure, les valeurs varient entre 0 et 17, en fonction de l'essai,

et ne présente aucune tendance apparente (Figure 5 - 2). L'essai SPT réalisé au forage F1 donne des indices N de 0 ou 1, tandis que l'essai SPT au forage FZ-05 montre des indices N plus élevés, entre 6 et 17. La Figure 7 - 7 présente la relation  $S_{uUU}/N_{60}$  en fonction de l'indice de plasticité, qui a été déterminée à partir de sols argileux raides (Stroud, 1974). Cette relation ne fonctionne pas pour les argiles de l'est du Canada. Ce rapport varie typiquement entre 6 et 4 selon la plasticité. À partir de cette relation, un rapport de 5 est utilisé afin de dresser des profils de résistance au cisaillement non drainé pour les sols des deux sites d'étude. Il n'y a toutefois qu'au site de Notre-Dame-des-Neiges que l'indice N corrigé (N<sub>60</sub>) peut être utilisé à partir de l'essai SPT réalisé dans le forage FZ-05 lors de la campagne de 2014. Les indices N bruts sont utilisés pour les autres profils.

La Figure 7 - 8 présente les profils de Su déduits des indices N bruts en relation avec les profils de résistance au cisaillement non drainé provenant des essais pressiométriques, des essais triaxiaux CIU, des essais au piézocône (CPTu1) et du piézocône sismigue (CM-03), et des essais scissométriques (F1 et F2), pour le site de l'Isle-Verte. Pour l'unité supérieure, le profil de Su déduit des indices N bruts concordent assez bien avec les valeurs de S<sub>u</sub> obtenues à partir des essais pressiométriques (pour un  $\beta$ ' de 11) et des valeurs de C<sub>u</sub> provenant des essais triaxiaux. La résistance au cisaillement non drainé est toutefois inférieure à celle déduite du piézocône sismigue CM-03 en utilisant un Nkt de 18. Pour l'unité intermédiaire, l'accord est relativement bon, bien qu'il y ait de la dispersion dans les résultats. Pour l'unité inférieure, la résistance au cisaillement non drainé déduite de l'essai SPT F1 est environ deux fois plus faible que celle obtenue des essais scissométriques. Bien qu'il y a un certain accord général entre ces profils, les indices N<sub>60</sub> seraient nécessaires afin d'avoir un lien plus étroit entre ces divers profils de résistance au cisaillement non drainé. La Figure 7 - 9 présente les profils de S<sub>u</sub> déduits des indices N bruts et N<sub>60</sub> en relation avec les profils de résistance au cisaillement non drainé provenant des essais triaxiaux CIU, des essais au piézocône (CPTu1) et piézocône sismique (CM-05) et des essais scissométriques (C1-1 et C1-2), pour le site de Notre-Dame-des-Neiges. Le profil de Su déduit des indices N<sub>60</sub> (FZ-05) s'accorde beaucoup mieux aux différents profils de résistance au cisaillement non drainé pour l'unité supérieure. Par contre, le profil donne des valeurs de S<sub>u</sub> trop élevées pour l'unité intermédiaire et des valeurs trop faibles pour l'unité inférieure, comme pour le site de l'Isle-Verte.

Pour les deux sites, il est préférable d'utiliser les indices  $N_{60}$  afin d'obtenir un meilleur accord des profils de résistance au cisaillement non drainé. Un rapport  $S_{uUU}/N_{60}$  de 5 permet d'avoir un accord acceptable des différents profils de résistance au cisaillement non drainé pour les unités supérieures et intermédiaires. L'utilisation de l'essai de pénétration standard ( $N_{60}$ ) peut donc permettre d'obtenir une approximation très générale de la résistance au cisaillement non drainé dans les sols très raides du Bas-Saint-Laurent, mais n'est pas conseillé pour l'unité inférieure. En effet, ces relations ne s'appliquent pas dans les argiles sédimentaires de l'est du Canada, l'essai SPT donnant typiquement des valeurs de 0 ou 1 presqu'indépendemment de la résistance au cisaillement non drainé de l'argile, et c'est apparamment sensiblement la même chose pour l'unité inférieure des sites d'étude. Le rapport S<sub>u</sub>/N<sub>60</sub> devrait donc être beaucoup plus élevé que dans les

argiles non sensibles qui ont été considérées pour établir la relation. Aux sites d'étude concernés ici, l'argile de l'unité inférieure a une faible sensibilité, mais nécessiterait tout de même un rapport S<sub>u</sub>/N<sub>60</sub> beaucoup plus grand que le rapport de 5. Cette relation a été utilisée dans les unités supérieures et intermédiaires afin de faire un parallèle avec les valeurs de résistance déduites des essais triaxiaux et des essais pressiométriques. De fait, cela donne des valeurs du même ordre de grandeur.

#### 7.1.3.2 Scissomètre de chantier

À cause de la consistance très raide des sols des unités supérieure et intermédiaire, le scissomètre de chantier est impraticable dans ces unités. Il est toutefois utilisable dans l'unité inférieure et des profils scissométriques ont été réalisés lors des premières campagnes de terrain sur les deux sites. À l'Isle-Verte, la valeur moyenne de résistance au cisaillement non drainé dans l'unité inférieure obtenue par les deux profils de scissomètre de chantier est de 67 kPa en F1 et de 51 kPa en F2. Les valeurs obtenues en F2 sont toutefois très dispersées comparativement au scissomètre en F1 où les valeurs montrent peu de dispersion. Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé augmentent légèrement avec la profondeur. Ces profils sont visibles sur le profil de synthèse (Figure 4 - 2) et aussi sur la Figure 7 - 8. À Notre-Dame-des-Neiges, la résistance au cisaillement non drainé moyenne mesurée au forage F2 est de 99 kPa. Les profils scissométriques réalisées lors de la campagne de 2012 aux forages C1-1 et C1-2 donnent respectivement des valeurs moyennes de 113 kPa et 121 kPa. Ces deux profils sont visibles sur le profil de synthèse de Notre-Dame-des-Neiges (Figure 5 - 2) et sur la Figure 7 - 9, tandis que le profil scissométrique F2 est visible à l'Annexe B8 - 2. Ces résultats indiquent que la résistance au cisaillement non drainé mesurée au scissomètre de chantier dans l'unité inférieure est près de deux fois plus élevée au site de Notre-Dame-des-Neiges qu'au site de l'Isle-Verte, ce qui est principalement dû au fait que la contrainte effective verticale à une profondeur donnée sont beaucoup plus élevées à Notre-Dame-des-Neiges qu'à l'Isle-Verte. Tout comme à l'Isle-Verte, la résistance augmente légèrement avec la profondeur dans l'unité inférieure.

Le rapport  $S_{uV}/\sigma'_{v0}$  donne une bonne indication du degré de consolidation d'un dépôt de sol argileux. Une argile normalement consolidée typique de l'est du Canada, dont l'indice de plasticité est d'environ 20 à 25, présente un rapport  $S_{uV}/\sigma'_{v0}$  de 0,25 (Leroueil et al., 2003). Ce rapport a été calculé pour les deux sites et les résultats sont présentés au Tableau 7 - 2 et à la Figure 7 - 10. À l'Isle-Verte, le profil de résistance au cisaillement non drainé fait au scissomètre de chantier au forage F1 est utilisé, et le rapport  $S_{uV}/\sigma'_{v0}$  indique une valeur moyenne de 0,21, pour un indice de plasticité moyen de 18,2. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, le scissomètre fait au forage F2 ne peut pas être utilisé, car ce forage se situe dans le talus et ne présente que l'unité inférieure. Comme une importante partie du dépôt a été supprimée par érosion, l'unité inférieure y est surconsolidée. Toutefois, des profils scissométriques ont été effectués à C1-1 et C1-2 lors de la deuxième campagne de terrain de 2012. Les rapports  $S_{uV}/\sigma'_{v0}$  indiquent des valeurs moyennes de 0,19 et 0,20, pour des l<sub>p</sub> moyens respectifs de 12,7 et 12,0. Ces rapports d'environ 0,2 indiquent

donc que les paramètres utilisés pour obtenir les profils  $S_u$  et  $\sigma'_p$  au piézocône sont cohérents entre eux.

#### 7.1.3.3 Essais au piézocône

Au site de l'Isle-Verte, trois piézocônes (C-01 à C-03) et un piézocône sismique (CM-03) ont été réalisés durant la campagne de 2014. Seul les piézocônes C-03 et CM-03 se retrouvent directement au niveau du site d'étude, les deux autres se retrouvant à proximité. De plus, le piézocône CPTu1 a également été réalisé lors de la campagne 2006 par le MTMDET. Tous les essais au piézocône sont présentés à l'Annexe A4. La différence constante d'environ 200 kPa entre la résistance en pointe corrigée des deux piézocônes C-03 et CM-03 n'est pas bien comprise, mais pourrait être due au changement de sonde. Le piézocône CPTu1 et le piézocône sismique CM-03 ont été utilisés afin de vérifier les corrélations avec les profils scissométriques, les valeurs de pression de préconsolidation et le profil de contraintes effectives, qui se retrouvent dans le profil de synthèse (Figure 4 - 2) et sur la Figure 7 - 6. Pour ce qui est du profil de résistance au cisaillement non drainé, la valeur du paramètre NkT utilisé est de 18. Cela permet d'avoir un bon accord entre les valeurs obtenues au scissomètre de chantier, le profil de Su de CM-03 ainsi qu'avec le profil de S<sub>u</sub> de CPTu1. La valeur du paramètre N<sub> $\sigma$ T</sub> de 3,4 a été utilisée par défaut (Demers & Leroueil, 2002), étant donné que les valeurs de pression de préconsolidation obtenues lors de la campagne de 2006 donnent des valeurs plus faibles que le profil de contrainte effective verticale. Les profils de or'p des piézocônes CM-03 et CPTu1 s'accordent très bien avec cette valeur. Il est possible de voir que le sol est surconsolidé dans l'unité supérieure avec des valeurs d'OCR qui varient de 14 à 6. Le rapport de surconsolidation diminue dans l'unité intermédiaire et varie entre 2,3 et 1,7. Dans l'unité inférieure, le rapport de surconsolidation est d'environ 1,3 et diminue légèrement avec la profondeur, ce qui montre que le sol de cette unité serait légèrement surconsolidé. Ces valeurs donnent des rapports de  $S_{uv}/\sigma_p^{\circ}$  de 0,20 qui sont un peu faibles (Figure 7 - 8), mais confirment que le sol de l'unité inférieure est à peu près normalement consolidé.

Au site de Notre-Dame-des-Neiges, le piézocône sismique CM-04 n'a pas été complété et donc, le piézocône sismique CM-05 réalisé par Qualitas en 2013 a donc été utilisé pour le projet. De plus, deux piézocônes (CPTu1 et CPTu2) ont été réalisés au niveau de leur forage respectif lors de la campagne de terrain de 2008. Tous les profils sont présentés à l'Annexe B3. Comme il en a été fait mention à la section 5.6.3, il semble plus justifiable d'utiliser le piézocône CPTu1 afin de caler le profil avec les valeurs de résistance au cisaillement non drainé provenant des essais scissométriques C1-1 et C1-2. La valeur du paramètre N<sub>kT</sub> retenue est de 18 selon cette configuration de données, tout comme au site de l'Isle-Verte. En fait, l'accord entre le profil CM-05 et les profils scissométriques C1-1 et C1-2 n'est pas optimal et indiquerait une valeur de N<sub>kT</sub> plus près de 12. La valeur du paramètre N<sub> $\sigma$ T</sub> de 3,4 a été utilisée par défaut (Demers & Leroueil, 2002), étant donné que les valeurs de pression de préconsolidation obtenues lors de la campagne de 2008 donnent des valeurs plus faibles que le profil de contrainte effective verticale. Tout comme avec le profil de résistance au cisaillement non drainé, le profil de  $\sigma'_p$  obtenu avec CM-05 ne s'accorde pas avec le piézocône CPTu1. D'ailleurs, il serait plus faible que le profil de contraintes

effectives, ce qui n'est pas possible dans ce cas-ci. Toutefois, le profil de  $\sigma'_p$  déduit du piézocône CPTu1 s'accorde très bien avec le profil de contrainte effective verticale, laissant présumer que le sol de l'unité inférieure serait normalement consolidé ou légèrement surconsolidé. Le rapport S<sub>uV</sub>/ $\sigma'_p$  est donc de 0,19 (Figure 7 - 8). Il est possible de voir que le sol est surconsolidé dans l'unité supérieure avec des valeurs d'OCR qui varient de 9 à 2,5. Le rapport de surconsolidation diminue dans l'unité intermédiaire et varie entre 2,7 et 1. Dans l'unité inférieure, le rapport de surconsolidation augmente très légèrement avec la profondeur et la valeur est d'environ 1, ce qui montre que le sol de cette unité est à peu près normalement consolidé.

Les rapports  $B_q$  obtenus lors des essais au piézocône aux deux sites sont de l'ordre de 0 à 0,3 pour l'unité supérieure, de 0,4 à 0,6 pour l'unité intermédiaire et de 0,8 à 1 et parfois même un peu plus pour l'unité inférieure. À l'Isle-Verte, le rapport  $B_q$  supérieur à 1 apparaît dans le piézocône C-03, mais cela n'apparaît pas dans le profil du piézocône sismique CM-03, où le  $B_q$  est constant à 0,9. À Notre-Dame-des-Neiges, le rapport  $B_q$  de CPTu1 indique des valeurs de 0,9 pour l'unité inférieure. Pour les argiles de l'est du Canada, le rapport  $B_q$  varie entre 0,45 et 0,87, avec une tendance à décroître avec l'augmentation du rapport de surconsolidation, bien qu'aucune relation n'ait été trouvée entre les deux paramètres (Demers & Leroueil, 2002). Donc, un rapport  $B_q$  faible comme dans les unités supérieures des deux sites indique que l'augmentation de résistance en pointe est nettement supérieure à l'augmentation des pressions interstitielles durant l'essai et confirme la surconsolidation. Le rapport  $B_q$  élevé obtenu dans l'unité inférieure des deux sites et durant différentes campagnes d'investigation est cohérent avec les valeurs de  $\sigma'_p$  déduites du piézocône, indiquant un sol faiblement surconsolidé ou normalement consolidé.

# 7.1.3.4 Vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol et module à petites déformations (G<sub>max</sub>)

Les piézocônes sismiques CM-03 (Isle-Verte) et CM-05 (Notre-Dame-des-Neiges) permettent d'obtenir les profils de vitesses de propagation des ondes de cisaillement dans le sol pour chacun des sites d'étude, à partir des mesures directes. Toutefois, Il est également possible de calculer les V<sub>s</sub> à partir de relations empiriques développés par différents auteurs, tel que mentionné au Chapitre 3. Les Figures 7 - 11 et 7 - 12 présentent le profil de résistance en pointe q<sub>t</sub> ainsi que les différents profils des Vs pour les piézocônes sismiques CM-03 (Isle-Verte) et CM-05 (Notre-Damedes-Neiges). Pour le site de l'Isle-Verte, les vitesses obtenues par mesures réelles sont légèrement plus faibles dans l'unité inférieure avec une vitesse moyenne de 226 m/s par rapport aux unités supérieure et intermédiaire, qui présentent des Vs moyennes respectives de 270 et 278 m/s. La différence est d'environ 45 à 50 m/s. Il ne semble pas y avoir de différence de vitesse entre les unités supérieure et intermédiaire. Par contre, les vitesses mesurées directement sur le terrain au site de Notre-Dame-des-Neiges ne montrent pas de différence entre les différentes unités. La vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement dans l'unité supérieure est de 285 m/s, ce qui est relativement semblable au site de l'Isle-Verte. Il y a par la suite une légère augmentation de celle-ci due à une zone de consistance plus raide vers le bas de l'unité supérieure et l'unité intermédiaire. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans l'unité inférieure est

semblable à celle de l'unité supérieure, voir même légèrement supérieure avec une valeur moyenne de 290 m/s. Cette valeur élevée peut être due aux contraintes verticales effectives qui sont plus élevées qu'à l'Isle-Verte pour une profondeur donnée. Ces vitesses de progagation des ondes de cisaillement dans le sol, que ce soit l'unité supérieure, intermédiaire ou inférieure, font partie de la classe de site D (sol raide) du NRC (Hunter & Crow, 2012, pour ce qui a trait aux catégories de sites séismiques) avec une plage de valeurs de 180 à 360 m/s. Ces vitesses sont également semblables à ce qui a été mesuré dans les argiles de Londres (Gasparre, 2005).

Il est intéressant de pouvoir comparer les mesures directes avec celles obtenues par les relations décrites ci-haut. Rappelons que la méthode de Robertson (2012) utilise la résistance en pointe nette et l'indice de comportement du sol pour obtenir V<sub>s</sub>, tandis que la méthode de Mayne (2007) utilise le frottement (f<sub>s</sub>). La méthode d'Andrus et al. (2007), quant à elle, utilise la profondeur, l'indice de comportement du sol (l<sub>c</sub>) ainsi que la résistance en pointe corrigée (q<sub>t</sub>). Cette dernière méthode est celle qui globalement, se rapproche le plus des mesures réelles, notamment pour le profil de Notre-Dame-des-Neiges. Pour le site de l'Isle-Verte, cette méthode concorde moins bien avec l'unité inférieure, où la diminution des V<sub>s</sub> n'est pas vraiment marquée. Les méthodes de Robertson et de Mayne montrent clairement une diminution de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol lors du passage à l'unité inférieure. Malgré la possibilité d'utiliser ces relations lorsque des mesures directes ne sont pas disponibles, les résultats indiquent qu'il est préférable de s'en tenir aux valeurs mesurées lorsque celles-ci sont disponibles.

La mesure de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol (V<sub>s</sub>) permet également d'obtenir le module à petites déformations du sol ( $G_{max}$ ), à partir de la masse volumique du matériau ( $\rho$ ) et de cette équation :

$$G_{\max} = \rho V_s^2.$$

La masse volumique moyenne utilisée pour le calcul de  $G_{max}$  dans chacune des unités de sol provient des résultats d'essais de laboratoire effectués pour ce projet, dont les poids volumiques ont été présentés à la section 7.1.1. Les valeurs de V<sub>s</sub> utilisées proviennent des mesures réelles obtenues lors de la réalisation des piézocônes sismiques CM-03 (Isle-Verte) et CM-05 (Notre-Dame-des-Neiges). La Figure 7 - 13 présente les valeurs de G<sub>max</sub> calculées en fonction de l'élévation pour le site de l'Isle-Verte. La valeur moyenne des modules à petites déformations pour l'unité supérieure est de 162 MPa, de 160 MPa pour l'unité intermédiaire et de 101 MPa pour l'unité inférieure. Les modules sont relativement les mêmes dans les unités supérieure et intermédiaire et l'unité inférieure possède des G<sub>max</sub> plus faibles. La Figure 7 - 14 présente les valeurs de G<sub>max</sub> calculées en fonction de l'élévation pour le site de Motre-Dame-des-Neiges. La valeur moyenne des modules à petites déformations pour l'unité intérieure possède des G<sub>max</sub> plus faibles. La Figure 7 - 14 présente les valeurs de G<sub>max</sub> calculées en fonction de l'élévation pour le site de Notre-Dame-des-Neiges. La valeur moyenne des modules à petites déformations pour l'unité supérieure est de 192 MPa, de 255 MPa pour l'unité intermédiaire et de 185 MPa pour l'unité inférieure. Contrairement au site de l'Isle-Verte où il y a clairement une diminution des modules entre les unités supérieure et inférieure, le site de Notre-Dame-des-Neiges ne présente pas de différence marquée dans les valeurs de modules de cisaillement à petites déformations et il y a une zone plus résistante à la

base de l'unité supérieure où les modules sont plus grands. Notons que G<sub>max</sub> dans l'unité inférieure est plus élevé à Notre-Dame-des-Neiges qu'à l'Isle-Verte, ce qui semble dû au fait que dans les deux cas, le sol est normalement consolidé, mais que les contraintes effectives verticales sont plus élevées à Notre-Dame-des-Neiges qu'à l'Isle-Verte.

#### 7.1.3.5 Essais pressiométriques

Lors de la campagne de 2006 au site de l'Isle-Verte, deux séries d'essais pressiométriques de type Ménard ont été réalisées, uniquement dans les unités supérieure et intermédiaire. L'Annexe A3 contient les tableaux des résultats des essais (Annexes A3 - 1 et A3 - 2) ainsi que l'ensemble des courbes pressiométriques. Les essais ont été effectués aux profondeurs de 4, 6, 10, 14, 18 et 22 m. Les 4 premiers essais de la première série, localisée au forage F2 (culée nord), donnent des résultats erronés pour ce qui est du module pressiométrique (E<sub>M</sub>), ce qui est montré par les courbes pressiométriques qui ne présentent pas d'inflexion entre les comportements dits « élastique » et « plastique » (Annexes A3 - 6 à A3 - 9). La deuxième série d'essais, cette fois-ci localisée au forage F1 (culée sud), donne des résultats plus cohérents, avec des valeurs de module pressiométrique plus élevées qui varient entre 34,6 MPa et 67,8 MPa pour les essais entre 4 et 14 m. La Figure 4 - 10 présente graphiquement les valeurs de module pressiométrique en fonction de la position des essais dans le dépôt de sol. Il est à noter que que ces valeurs sont typiquement trois fois plus faibles que les valeurs de G<sub>max</sub> déduites des essais au piézocône sismique (Figure 7 - 13 et 7 - 14). Cette différence est explicable par le niveau de déformation à laquelle est obtenue la valeur du module, le module de cisaillement G<sub>max</sub> étant obtenu à des déformations beaucoup plus petites que le module pressiométrique E<sub>M</sub>. Cet essai ne donne pas de valeurs à très petites déformations et il nécessite un trou de forage qui a tendance à remanier le sol.

La pression limite (P<sub>L</sub>) n'est pas affectée par le remaniement du trou de forage, à moins que le diamètre soit exagérément trop grand par rapport à celui de la sonde. Dans ce cas, la pression limite n'est pas atteignable, tout simplement dû aux limitations physiques de la sonde. Les valeurs de pression limite varient entre 1 400 et 2 000 kPa. La résistance au cisaillement non drainé (S<sub>uPM</sub>) peut être déterminée à partir des essais pressiométriques, tel que mentionné au Chapitre 3. La pression limite nette (P<sub>L</sub> -  $\sigma_{v0}$ ) doit être divisée par un paramètre  $\beta$ ' qui varie approximativement entre 6 et 12,5 et ce, en fonction du degré de surconsolidation du sol (Leroueil et al., 1983). Avec des valeurs de P<sub>L</sub> -  $\sigma_{v0}$  de l'ordre de 1500 kPa et un  $\beta$ ' de 12,5 (Figure 7 - 15), les résultats des essais pressiométriques du site de l'Isle-Verte concordent avec les résultats montrés dans l'article de Leroueil et al. (1983). C'est-à-dire que pour ces mêmes valeurs de pression limite nette, la résistance au cisaillement S<sub>uPM</sub> est d'environ 120 kPa. Ceci montre que pour les argiles surconsolidées, la valeur du paramètre  $\beta$ ' est supérieure à 6,5 et dans ce cas-ci varie entre 10 et 12,5 (Figure 7 - 15).

Les Figures 4 - 11 et 7 - 8 présentent les valeurs de résistance au cisaillement non drainé ( $S_{uPM}$ ) calculées à partir d'un paramètre  $\beta$ ' de 11 pour les essais pressiométriques. Dans l'unité

supérieure, les valeurs de S<sub>uPM</sub> varient entre environ 120 et 160 kPa, avec une moyenne de 141 kPa. Avec le piézocône, les valeurs de S<sub>u</sub> varient entre 150 et 230 kPa. Il n'est pas possible de comparer avec la résistance au cisaillement obtenue au scissomètre de chantier (S<sub>uV</sub>) étant donné qu'aucun essai scissométrique n'a été réalisé dans les unités supérieure et intermédiaire. De par ce fait, il est donc impossible d'obtenir un  $\beta$ ' directement à partir des résultats de terrain. Pour les essais triaxiaux CIU, les valeurs de résistance au cisaillement non drainé à des déformations de 13,4 à 13,9 % varient entre 80 et 145 kPa (moyenne de 117 kPa), toujours pour l'unité supérieure. Les valeurs mesurées au triaxial et celles déduites des essais pressiométriques sont donc d'un même ordre de grandeur.

#### 7.1.3.6 Essais oedométriques

Plusieurs essais oedométriques ont été réalisés sur des échantillons provenant des trois différentes unités de chacun des sites. À l'Isle-Verte, 8 échantillons ont été soumis à des essais oedométriques, soit 5 échantillons provenant de l'unité supérieure, 2 échantillons de l'unité intermédiaire et 1 échantillon de l'unité inférieure. À Notre-Dame-des-Neiges, 11 échantillons ont été soumis à des essais oedométriques, soit 5 échantillons provenant de l'unité supérieure, 4 échantillons de l'unité intermédiaire et 2 échantillons de l'unité inférieure. Les courbes oedométriques sont toutes présentées dans les Annexes A5 (Isle-Verte) et B4 (Notre-Dame-des-Neiges). Les courbes oedométriques de tous les échantillons ne montrent pas l'allure typique des courbes obtenues sur les argiles de la mer de Champlain, mais montrent plutôt l'allure des sols ayant des indices des vides naturels très faibles et pour lesquels la pression de préconsolidation est difficile à définir.

Le Tableau 7 - 3 présente les résultats des paramètres de compressibilité pour les deux sites d'étude. Pour le site de l'Isle-Verte, l'indice des vides naturel moyen est de 0,60 pour l'unité supérieure, de 0,79 pour l'unité intermédiaire et de 0,94 pour l'unité inférieure (1 seul essai). Pour le site de Notre-Dame-des-Neiges, l'indice des vides naturel moyen est de 0,55 pour l'unité supérieure, de 0,48 pour l'unité intermédiaire et finalement, de 0,58 pour l'unité inférieure. En règle générale, il est possible de constater que les indices des vides naturels des unités inférieures pour les deux sites sont plus élevés que ceux des deux autres unités. De plus, les sols de Notre-Dame-des-Neiges possèdent des indices des vides naturels plus faibles que les sols de l'Isle-Verte, peu importe l'unité considérée. Tous ces sols sont très denses et présentent des indices des vides naturels très faibles.

Pour ce qui est des indices de compression, le site de l'Isle-Verte montre des valeurs moyennes de C<sub>c</sub> de 0,17 pour l'unité supérieure, de 0,21 pour l'unité intermédiaire et de 0,25 pour l'unité inférieure. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, les valeurs moyennes de C<sub>c</sub> sont de 0,14 pour l'unité supérieure, de 0,11 pour l'unité intermédiaire et de 0,14 pour l'unité inférieure. Tout comme pour les indices des vides naturels, les indices de compression sont également légèrement plus élevés pour les unités inférieures des deux sites. Par contre, il ne semble pas y avoir de différence générale entre les indices de compression des deux sites. Ces sols du Bas-Saint-Laurent présentent donc une très faible compressibilité. Lorsque la teneur en eau est à la limite de

plasticité, comme c'est le cas pour les sols des unités supérieures, la porosité inter-aggrégats est pratiquement nulle, et ne laisse donc pas de place à la compressibilité. Il a été montré par Leroueil et al. (1991) qu'un cycle de gel-dégel peut influencer la compressibilité des sols argileux. En effet, ce cycle provoque un affaissement de la structure interne du sol, ce qui cause des déformations volumétriques importantes dues à la consolidation. Toutefois, la diminution de l'indice de liquidité dépend de l'indice de liquidité initial. Plus celui-ci est faible et plus l'effet d'un cycle gel-dégel est réduit. Il est à se demander si plusieurs cycles de gel-dégel peuvent amener l'indice de liquidité d'un sol à une valeur de près de 0. La surconsolidation de ces sols peut donc provenir d'un effet combiné de la surcharge par la masse glaciaire ainsi que du gel.

Pour ce qui est des indices de recompression, le site de l'Isle-Verte montre des valeurs moyennes de C<sub>s</sub> de 0,07 pour l'unité supérieure, de 0,05 pour l'unité intermédiaire et de 0,06 pour l'unité inférieure. Le site de Notre-Dame-des-Neiges montre des valeurs moyennes de C<sub>s</sub> de 0,04 pour l'unité supérieure, de 0,03 pour l'unité intermédiaire et de 0,03 pour l'unité inférieure. De façon générale, il semble que les unités supérieures des deux sites aient des indices de recompression plus élevés que les deux autres unités.

Avec les argiles de la mer de Champlain, il est possible de juger la qualité de l'échantillonnage par les valeurs des indices de recompression, qui sont d'environ 0,02 pour des échantillons de bonne qualité. Dans le cas où les sols argileux sont très raides, il n'est pas possible de se prononcer sur la qualité d'échantillonnage par ce paramètre, car ces sols argileux montrent tous des courbes de compression beaucoup moins franches, un peu comme les argiles de Londres. La Figure 7 - 16, tirée de Leroueil et al. (1983), montre la relation entre l'indice des vides naturel ( $e_0$ ), l'indice de compression ( $C_c$ ) et la sensibilité ( $S_t$ ) du sol naturel. Les sols des sites de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges sont peu sensibles, et possèdent des indices de compression très faibles, associés à des indices des vides naturels qui sont également faibles. La Figure 7 - 17 est un agrandissement de la relation  $C_c - e_0$  pour les sols de cette étude. Elle montre que  $C_c$  augmente avec l'indice des vides, approximativement selon la relation  $C_c = 0,31e_0 - 0,03$ .

#### 7.1.3.7 Essais triaxiaux

Pour le site de l'Isle-Verte, 6 échantillons ont été soumis à des essais triaxiaux CIU. Ceux-ci sont répartis entre les différentes unités, soit : 4 échantillons dans l'unité supérieure, 1 échantillon dans l'unité intermédiaire et 1 échantillon au sommet de l'unité inférieure. Pour le site de Notre-Damedes-Neiges, 4 échantillons ont été soumis à des essais triaxiaux pour l'unité supérieure, 1 échantillon pour l'unité intermédiaire et finalement, 2 échantillons pour l'unité inférieure. Tous les échantillons ont été consolidés sous la contrainte effective verticale en place, sauf l'échantillon S3-TM4 (voir section 4.8.2). Les résultats des essais triaxiaux CIU permettent de définir les paramètres de résistance des enveloppes de résistance pour les deux sites. À l'Isle-Verte, l'angle de frottement  $\phi'$  varie entre 26,5 et 28,5° et la cohésion entre 8 et 18 kPa. Les paramètres représentatifs sont une cohésion c' = 9 kPa et un angle de frottement  $\phi'$  = 28°, pour l'ensemble des essais (Figure 4 - 24). À Notre-Dame-des-Neiges, l'angle de frottement  $\phi'$  varie entre 27 et

29,5° (à l'exception de S1-TM1, avec un \u00f3' de 9°) et la cohésion entre 11 et 43 kPa (avec deux exceptions qui atteignent des valeurs de 78 kPa (S1-TM1) et 101 kPa (S2-TM6)). Les essais effectués sur les échantillons S1-TM1 et S2-TM6 sont considérés comme erronés. Le remaniement dû à l'échantillonnage du tube TM6, tel qu'illustré sur le résultat de tomodensitométrie, peut en être la cause. Les paramètres représentatifs sont une cohésion c' = 12 kPa et un angle de frottement  $\phi'$  = 29° (Figure 5 - 22). Les résultats de ce site montrent une dispersion plus importante des cheminements de contraintes comparativement aux résultats des échantillons de l'Isle-Verte. La Figure 7 - 18 met en relation les résultats des essais triaxiaux des deux sites en utilisant une enveloppe de résistance commune au deux sites, dont les paramètres sont un angle de frottement  $\phi' = 29^{\circ}$  et une cohésion c' = 10 kPa, ce qui est représentatif des deux sites et des trois unités. À partir des données disponibles, il n'apparaît pas possible de définir des paramètres de résistance différents d'une unité à l'autre et donc, tous les essais sont regroupés sur le même graphique. Une plus grande quantité d'essais permettrait de mieux définir cette enveloppe de résistance et peut-être même d'en définir une différente pour chaque unité. La compagnie Inspec-sol a également mené quelques essais triaxiaux dans l'unité inférieure du site de Notre-Dame-des-Neiges, soit au sommet et à la base de cette unité. Pour une profondeur de 22,89 à 24,43 m (sommet de l'unité, Annexe B5 - 4), les paramètres de l'enveloppe de résistance sont  $\phi' = 28^{\circ}$  et c' = 5 kPa. Le troisième essai d'Inspec-sol a été consolidé à une contrainte de 400 kPa, pour une contrainte effective verticale d'envion 450 kPa. L'échantillon CR13-B a été consolidé à une contrainte de 464 kPa, et la contrainte effective verticale est d'environ 500 kPa. Ce résultat concorde donc assez bien avec ce qui a été obtenu pour l'échantillon CR13-B ( $\phi$ ' = 29° et c' = 12 kPa). Pour une profondeur de 49,20 à 49,65 m (base de l'unité, Annexe B5 - 8), les paramètres de l'enveloppe de résistance sont  $\phi$ ' = 25° et c' = 24 kPa. À cette profondeur, la contrainte effective est d'environ 900 kPa, et donc ces échantillons ont été cisaillés dans le domaine surconsolidé, ce qui pourrait expliquer la forte cohésion et le faible angle de frottement.

Pour les unités supérieure et intermédiaire, le sol montre un comportement dilatant. Il est toutefois plus difficle de se prononcer sur un comportement pour le sol des unités inférieures. À l'Isle-Verte, l'échantillon S3-TM6 (27,67 m) ne présente pas nécessairement un comportement dilatant, son cheminement de contraintes montrant que la rupture est atteinte au niveau de l'enveloppe de résistance. De plus, un des deux échantillons de l'unité inférieure de Notre-Dame-des-Neiges (S2-TM6, profondeur de 27,65 m) semble erroné. Toutefois, les essais effectués par Inspec-sol sur les échantillons de Notre-Dame-des-Neiges indiquent un comportement dilatant. Les contraintes de consolidation pour les 3 essais à une profondeur entre 22,89 et 24,43 m sont de 150, 300 et 400 kPa (Annexe B5 - 4). À la profondeur de 49,20 à 49,65 m, les contraintes de consolidation sont de 200, 300 et 400 kPa (Annexe B5 - 8). À ce site, le profil de pression de préconsolidation obtenu au piézocône coïncide avec le profil de contrainte effective verticale dans l'unité inférieure, ce qui laisse donc présumer que le sol de cette unité serait normalement consolidé. Ces échantillons ont été cisaillés dans le domaine surconsolidé.

Selon Leroueil et al. (1991), les argiles de la mer de Champlain ayant été affectée par des cycles de gel-dégel montrent un comportement dilatant. Comme le gel joue un rôle sur le degré de surconsolidation des unités supérieure et intermédiaire, il peut aussi expliquer le comportement dilatant observé aux essais triaxiaux CIU effectués pour ce projet. Plus l'indice de liquidité initial est faible, plus le comportement observé est dilatant.

#### 7.1.4 Caractérisation hydraulique

Des mesures de conductivité hydraulique ont été réalisées à plusieurs indices des vides en même temps que des essais oedométriques effectués sur les différentes unités de sol de chacun des sites. En fait, une mesure est prise dans le domaine surconsolidé et trois mesures dans le domaine normalement consolidé. À l'Isle-Verte, ces mesures ont été faites sur les échantillons S2-TM1, S4-TM4 et S2-TM6, faisant partie respectivement des unités supérieure, intermédiaire et inférieure (Annexes A7 - 7 à A7 - 10). À Notre-Dame-des-Neiges, ces mesures ont été faites sur les échantillons S2-TM1, S1-TM3, CR10-B et S1-TM6, faisant partie respectivement des unités supérieure (S2-TM1 et S1-TM3), intermédiaire et inférieure (Annexes B6 - 9 à B6 - 13). Le Tableau 7 - 4 résument les propriétés hydrauliques des échantillons des deux sites d'étude. Du point de vue de la conductivité hydraulique, les valeurs obtenues pour les unités intermédiaire et inférieure à l'indice des vides naturel semblent assez constante autour de 2 à 3 x10<sup>-10</sup> m/s, que ce soit à l'Isle-Verte ou à Notre-Dame-des-Neiges. Typiquement, les valeurs de perméabilité pour les argiles molles de l'est du Canada se situent entre 3x10<sup>-10</sup> et 5x10<sup>-9</sup> m/s (Leroueil et al., 1983). Les résultats obtenus aux deux sites pour les unités intermédiaire et inférieure sont donc à la limite inférieure de ce domaine, ce qui est logique puisque l'indice des vides est très faible. L'unité supérieure de l'Isle-Verte possède une perméabilité plus faible, ce qui concorde également avec les paramètres de compressibilité déterminés aux essais oedométriques. La perméabilité de l'unité supérieure du site de Notre-Dame-des-Neiges est toutefois trop élevée par rapport aux autres résultats, ce qui laisse penser qu'il y a eu un problème avec ces deux essais, probablement des écoulements préférentiels. Il est à noter que ces valeurs n'ont pas été corrigées pour les effets reliés à la température.

La relation entre l'indice des vides naturel (e<sub>0</sub>) et l'indice de variation de la perméabilité (c<sub>k</sub>) pour les argiles de l'est du Canada est  $c_k \approx 0,5e_0$ , pour des déformations allant jusqu'à 20 % (Tavenas et al., 1983). La Figure 7 - 19 présente cette relation pour les sites à l'étude. Pour le site de l'Isle-Verte, les relations observées ne concordent pas tout à fait avec  $c_k = 0,5e_0$ , en particulier pour l'unité supérieure, où celle-ci est de  $c_k = 1,3e_0$ . Les unités intermédiaire et inférieure montrent une relation de  $c_k = 0,7e_0$ . Pour le site de Notre-Dame-des-Neiges, la relation est de  $c_k = 0,5e_0$  pour l'échantillon S2-TM1 de l'unité supérieure, mais la valeur de  $k_0$  est probablement trop élevée. La relation est de  $c_k = 0,32e_0$  pour l'échantillon S1-TM3 de l'unité supérieure et de  $c_k = 0,83e_0$  pour l'échantillon de l'unité intermédiaire. La relation est de  $c_k = 0,8e_0$  pour l'unité inférieure. Les sols de ces deux sites montrent que la variation de perméabilité avec l'indice des vides est plus grande que pour les argiles molles de l'est du Canada, ce qui est peut-être dû au fait que l'indice des vides est faible sur les sites étudiés. Par contre, Cotecchia (2002) a trouvé que la relation  $c_k - e_0$  pouvait être plus faible que 0,5 pour des sols à indices des vides faibles, comme l'argile de Pappadai ( $e_0 = 0,83$ ). C'est ce qui est obtenu avec l'échantillon S1-TM3.

### 7.2 Effet de l'échantillonnage sur les résultats

Les résultats des essais de laboratoire qui doivent être réalisés sur des sols intacts sont grandement influencés par la qualité de l'échantillonnage, qui peut engendrer des déformations et causer une déstructuration et un remaniement, faible à élevé, des échantillons prélevés. La déstructuration d'un sol argileux influence directement ses propriétés mécaniques et il est donc primordial de limiter les déformations lors de l'échantillonnage afin de préserver la structure du sol et ainsi permettre de mesurer les propriétés mécaniques qui sont représentatives du sol intact. Dans le cadre du projet, deux techniques d'échantillonnage ont été privilégiées, soit l'utilisation de tubes de grand diamètre et le carottage PQ<sub>3</sub>. Deux types de tubes de grand diamètre ont été utilisés pour échantillonner les sols cohérents (Figure 3 - 1). Dans les deux cas, il s'agit de tubes possédant un diamètre intérieur de 120,8 mm. Le premier type possède des parois d'une épaisseur de 3,1 mm (tube mince) et le deuxième des parois de 6,35 mm (tube épais). Les détails de ces techniques se retrouvent au Chapitre 3. L'utilisation de tubes Shelby n'a pas été privilégié pour ce projet, mis à part les quelques échantillons qui ont été récupérés par le MTMDET lors des premières campagnes de terrain des deux sites. La Rochelle et al. (1981) résument les quatre causes possibles de remaniement lors de l'échantillonnage. Il y a la préparation du trou de forage qui peut remanier le sol même avant l'échantillonnage, les déformations mécaniques engendrées durant l'enfoncement des tubes, les déformations mécaniques et les effets de succion lors du retrait de l'échantillon et finalement, le relâchement des contraintes totales in-situ. Cette section permettra de discuter sur les effets de remaniement des deux méthodes d'échantillonnage utilisées durant le projet.

L'état limite du sol peut être atteint à différents endroits et le sol déstructuré en fonction de la variation des contraintes totales qui peut être positive en avant du tube lors de l'enfoncement ou négatives dues à la succion dans la partie inférieure de l'échantillon lors de son retrait. L'effet du remaniement sur les propriétés mécaniques sont une diminution des résistances au cisaillement en pic non drainée et drainée, une diminution des modules de Young et de cisaillement et un changement des indices de compression (diminution) et de recompression (augmentation) (La Rochelle et al., 1981). Ces essais peuvent donc permettre d'obtenir un indicateur de la qualité de l'échantillonnage. Dans le cadre du projet, des essais oedométriques et triaxiaux ont été menés sur des échantillons prélevés à des élévations similaires, mais avec les deux différentes techniques de récupération décrites ci-haut.

Étant donné que les sols des deux sites sont fortement surconsolidés, du moins pour les unités supérieure et intermédiaire, il y a moins de risque que les cheminements de contraintes atteignent l'état limite lors de l'échantillonnage. Ce qui veut dire que la structure de ces sols est donc probablement préservée et que les propriétés mécaniques obtenues se rapprochent possiblement de celles du sol intact.

#### 7.2.1 Échantillonnage par tube de grand diamètre

Le Tableau 7 - 5 permet de comparer les propriétés géométriques des tubes de grand diamètre utilisés pour ce projet d'étude avec le tube de l'échantillonneur Laval. Tel que mentionné dans le Chapitre 3, les paramètres les plus importants à vérifier sont le rapport de surface ( $A_r$ ), le rapport de dégagement intérieur (ICR) et l'angle de coupe ( $\alpha$ ).

Le rapport de surface est fonction de l'épaisseur des parois du tube. Plus celle-ci est grande et plus le rapport de surface sera grand, ce qui n'est pas souhaitable compte tenu du fait que plus l'épaisseur des parois est grande, plus il y a de matériau déplacé vers l'extrémité du tube lors de l'insertion. Il faut donc chercher à minimiser le rapport de surface. L'échantillonneur Laval possède un A<sub>r</sub> de 9,8 %, tandis que le tube de grand diamètre mince utilisé a un A<sub>r</sub> de 10,5 %, ce qui est relativement semblable. Toutefois, l'augmentation de l'épaisseur des parois d'environ le double pour le tube de grand diamètre épais fait en sorte que le rapport de surface augmente également du même rapport, et davantage de déformations peuvent survenir avec l'utilisation de ces tubes. L'angle de coupe de 6° est suffisament petit pour s'assurer que les changements de volume à l'extrémité du tube lors de son insertion se produisent vers l'extérieur et non vers l'intérieur du tube, et il est approximativement le même que celui de l'échantillonneur Laval (5°). Selon La Rochelle et al. (1981), le fait d'avoir un ICR supérieur à 0 induit une certaine expansion latérale du sol lorsqu'il est forcé à l'intérieur du tube, ce qui résulte en des déformations. Ce dégagement intérieur augmente également le rapport de surface. Il est donc préférable de l'éliminer et donc d'avoir un diamètre d'ouverture égal au diamètre intérieur. Les deux tubes utilisés pour ce projet possèdent une longueur de 1 000 mm, ce qui permet d'obtenir plus de sol considéré intact, car les extrémités du tube sont jugés inutilisables à cause des déformations (La Rochelle et al., 1981). Le tube de grand diamètre mince, utilisé pour le projet, possède des caractéristiques intéressantes qui font que sur papier, il se rapproche de l'échantillonneur Laval. Le diamètre intérieur est plus faible que l'échantillonneur Laval, mais ce paramètre influence moins l'effet du remaniement que les deux autres. Il serait donc logique d'obtenir des échantillons de bonne qualité. Les échantillons récupérés avec le tube de grand diamètre plus épais sont par contre à risques de subir davantage de déformations dues à la géométrie de ce tube.

Il existe une différence majeure entre l'échantillonneur Laval et les tubes de grand diamètre utilisés. Celle-ci concerne la succion qui peut être générée lors du retrait du tube. Avec l'échantillonneur Laval, on procède à un surcarottage du sol autour du tube d'échantillonnage avec injection de bentonite afin de limiter la succion.

#### 7.2.2 Échantillonnage par carottage

La technique de carottage PQ<sub>3</sub> utilisé aux deux sites d'étude est couramment utilisée pour la récupération des argiles de Londres de consistance très raide à dure. Cette technique permet de carotter un matériau et d'obtenir, dans le cas des argiles de Londres, des échantillons de meilleure qualité qu'avec des tubes. Des essais de compression en cellule triaxiale en condition non drainée ont montré que les échantillons provenant de cette méthode de carottage possédaient des

enveloppes de rupture supérieures que les échantillons récupérés par tubes de 100 mm pour de mêmes profondeurs (Hight, 1993).

Lors du carottage, l'échantillon de sol est partiellement isolé du fluide de forage, car il est placé dans un tubage interne le protégeant. Malgré tout, le fluide de forage peut quand même remanier la surface extérieure de la carotte. Avant de sceller l'échantillon qui vient d'être carotté, il faut enlever la couche externe qui est remaniée par le fluide de forage. Ceci permet d'éviter qu'il y ait un changement de la teneur en eau in-situ et le gonflement dû à l'eau libre (Gasparre, 2005). En effet, cette eau libre a tendance à migrer vers l'intérieur de l'échantillon qui est en succion si elle n'est pas enlevée. La Rochelle et al. (1981) explique que l'échantillonnage a tendance à remanier une certaine épaisseur de sol à la surface. Ce remaniement serait dû au relâchement des contraintes totales et au rééquilibrage des pressions interstitielles négatives qui prévalent au moment de l'échantillonnage. Avec le temps, l'eau peut migrer vers l'intérieur de l'échantillon et changer les caractéristiques du sol.

# 7.2.3 Comparaison des deux techniques d'échantillonnage à partir des résultats de laboratoire

Dans certains cas, des essais oedométriques et triaxiaux (CIU) ont été effectués sur des échantillons prélevés par les deux méthodes d'échantillonnage et à des élévations similaires. Pour les essais oedométriques, le Tableau 7 - 3 permet d'avoir les valeurs des indices de compression pour les différents échantillons analysés. Au site de l'Isle-Verte, il n'y a que des comparaisons dans l'unité supérieure qui ont été effectuées, car aucun échantillonnage par carottage n'a été effectué dans l'unité intermédiaire. La Figure 4 - 14 montre la comparaison des échantillons CR2-A et S2-TM1 (tube de 120 mm épais) à l'essai oedométrique. L'échantillon CR2-A montre un indice de compression plus élevé et un indice de recompression plus faible que l'échantillon S2-TM1. La Figure 4 - 15 montre la comparaison des échantillons CR4-A et S2-TM2 (tube de 5" épais) à l'essai oedométrique. L'échantillon CR4-A montre également un indice de compression plus élevé, mais possède un indice de recompression plus élevé que l'échantillon S2-TM2. Deux comparaisons ont également été faites pour les essais triaxiaux. Les Figures 4 - 17 à 4 - 19 présentent les résultats des essais sur les échantillons CR2-C et S2-TM1 (tube de 120 mm épais) et les Figures 4 - 20 à 4 - 22 présentent la comparaison des échantillons CR4-C et S1-TM2 tube de 120 mm épais). La première comparaison montre que la résistance au cisaillement à grande déformation est d'environ 50 kPa plus élevée pour l'échantillon S2-TM1 prélevé par tube. Pour ce qui est de la deuxième comparaison, la résistance au cisaillement à grande déformation est légèrement plus élevée pour l'échantillon CR4-C, mais les deux échantillons ne présentent pas le même comportement contrainte-déformation.

Au site Notre-Dame-des-Neiges, des comparaisons dans les trois unités ont été effectués, étant donné que la méthode par carottage a été utilisée jusqu'au sommet de l'unité inférieure. La Figure 5 - 10 montre la comparaison des échantillons CR1-B et S2-TM1 (tube de 120 mm mince) à l'essai oedométrique. L'échantillon CR1-B montre un indice de recompression plus faible que l'échantillon

S2-TM1, tandis que les indices de compression sont sensiblement les mêmes. La Figure 5 - 11 compare les échantillons CR5-B et S3-TM2 (tube de 120 mm mince) à l'essai oedométrique. L'échantillon CR5-B a un indice de compression et de recompression légèrement plus faible que l'échantillon S3-TM2. Ces échantillons font partie de l'unité supérieure. La Figure 5 - 12 compare les échantillons de l'unité intermédiaire CR8-A et S2-TM4 (tube de 120 mm épais) à l'essai oedométrique. L'échantillon CR8-A a un indice de compression plus faible que l'échantillon S2-TM4, tandis que son indice de recompression est légèrement plus élevé. La Figure 5 - 13 compare les échantillons du sommet de l'unité inférieure CR13-A et S1-TM6 (tube de 120 mm mince) à l'essai oedométrique. L'échantillon CR13-A a un indice de compression légèrement plus faible. mais un indice de recompression plus élevé que l'échantillon S1-TM6. Deux comparaisons ont également été faites pour les essais triaxiaux, soit une dans l'unité supérieure et une dans l'unité inférieure. Les Figures 5 - 15 à 5 - 17 comparent les échantillons CR1-B et S1-TM1 (tube de 120 mm mince) et les Figures 5 - 18 à 5 - 20 comparent les échantillons CR13-B et S2-TM6 (tube de 120 mm mince). La première comparaison montre que la résistance au cisaillement à grande déformation est beaucoup plus élevée pour l'échantillon CR1-B prélevé par carottage, soit d'environ 200 kPa. L'échantillon CR1-B présente un comportement contrainte-déformation de type écrouissage, tandis que l'échantillon S1-TM1 atteint un plateau à environ 5 % de déformation. Pour ce qui est de la deuxième comparaison, le comportement contrainte-déformation est le même que pour la comparaison précédente et la résistance au cisaillement à grande déformation atteinte par l'échantillon CR13-B est plus élevée d'environ 150 kPa.

#### 7.2.4 Synthèse sur les méthodes d'échantillonnage

Il n'est pas évident de tirer des conclusions sur la méthode d'échantillonnage simplement à partir de ces comparaisons. Les deux méthodes donnent des résultats relativement similaires et peuvent donc être utilisées. Toutefois, si on utilise les indices de recompression comme méthode de comparaison et comme indicateur de remaniement, la méthode par carottage sied mieux aux unités supérieure et intermédiaire, plus denses et raides, du site de Notre-Dame-des-Neiges qu'aux unités du site de l'Isle-Verte. Par contre, la méthode par tube de grand diamètre est préférable dans les sols moins raides des unités inférieures, comme le démontre les indices de recompression plus faibles de l'échantillon S1-TM6 par rapport à l'échantillon CR13-A (Notre-Dame-des-Neiges). Les comparaisons au site de l'Isle-Verte ont été faites sur des échantillons prélevés avec les tubes de 120,8 mm épais, qui techniquement, doivent générer plus de déformations du sol lors de l'insertion. Tout de même, les indices de recompression obtenus sont plus faibles que pour les échantillons obtenus par carottage. Donc, la méthode d'échantillonnage par tube de grand diamètre semble être plus efficace au site de l'Isle-Verte, tandis que la méthode par carottage semble être meilleure pour les unités supérieure et intermédiaire de Notre-Damedes-Neiges. L'unité inférieure de ce site devrait être échantillonnée par tube de grand diamètre, car même si la méthode par carottage peut être utilisée, la manipulation des carottes afin de les sceller est difficile et peut contribuer à des déformations supplémentaires non voulues. Néanmoins, l'utilisation des indices de recompression pour évaluer les techniques d'échantillonnage n'est peut être pas la bonne solution pour ces sols argileux très raides, car leur comportement n'est pas le
même que pour les argiles de la mer de Champlain avec lesquelles le C<sub>s</sub> peut être utilisé pour juger de la qualité de l'échantillonnage. À moins d'obtenir d'autres comparaisons, on considère que les deux méthodes d'échantillonnage, par carottage PQ<sub>3</sub> et par tubes de grand diamètre (120,8 mm), sont à peu près équivalentes.

Les courbes oedométriques des échantillons ne présentent pas l'allure typique des argiles de l'est du Canada. C'est le même constat quant au comportement anti-écrouissage normalement retrouvé pour ces argiles. Dans ce cas, les échantillons ne présentent pas de pic de résistance, ni de diminution de résistance suite à ce pic. Ces comportements pourraient provenir de la déstructuration naturelle des sols originaux par surcharge causée par les dépôts supérieur et intermédiaire. Par contre, puisque l'unité inférieure semble être à peu près normalement consolidée, cela implique qu'il n'y a pas eu surcharge par le poids des glaciers.

# Tableaux

Site	Échantillon Unité %		% carbonates ATG	% carbonates Chittick	
	CR4-A	supérieure	6.8 ± 0.2	5.4 ± 0.3	
Isle-Verte	S2-TM5	intermédiaire	4.2 ± 0.2	4.9 ± 0.3	
	S2-TM6	inférieure	4.2 ± 0.2	6.2 ± 0.3	
Notre-Dame-	CR8-A	supérieure	7.0 ± 0.2	8.1 ± 0.3	
des-Neiges	CR13-A	inférieure	7.9 ± 0.2	6.5 ± 0.3	

Tableau 7 - 1 : Comparaison du pourcentage de carbonates total par les méthodes Chittick et ATG

Tableau 7 - 2 : Résultats des relations  $S_{uv}/\sigma'_{v0}$  et  $S_{uv}/\sigma'_p$  en fonction de l'indice de plasticité pour les deux sites d'étude

Isle-Verte						
Forage	l <sub>p</sub>	$S_{uv}/\sigma'_{v0}$	$S_{uv}/\sigma'_{p CPTu1}$			
F1	18.2	0.21	0.20			
Notre-Dame-des-Neiges						
Forage	l <sub>p</sub>	S <sub>uV</sub> /σ' <sub>v0</sub>	$S_{uv}/\sigma'_{pCM-05}$			
C1-1	12.7	0.19	0.18			
C1-2	12.0	0.20	0.19			

Site	Échantillon	Élévation (m)	Unité	e <sub>0</sub>	σ' <sub>p</sub> (kPa)	σ' <sub>v0</sub> (kPa)	C <sub>c</sub>	Cs	C <sub>s d-r</sub>
	CR1-A	21.34		0.58	900	64	0.17	0.08	0.08
	CR2-A	19.66		0.62	725	83	0.20	0.07	0.08
	S2-TM1	19.26	Supérieure	0.54	1150	87	0.17	0.06	0.06
Icle Vorte	CR4-A	16.36		0.65	875	120	0.22	0.08	0.09
isie-verte	S2-TM2	16.12		0.63	1400	122	0.10	0.06	0.07
	S4-TM4	6.03	Intormódiairo	0.78	315	227	0.22	0.03	0.07
	S2-TM5	3.08	Internetiaire	0.80	310	253	0.21	0.06	0.07
	S2-TM6	-1.09	Inférieure	0.94	200	290	0.25	0.06	0.08
	CR1-B	72.86	Supérieure	0.54	790	219	0.16	0.03	0.04
	S2-TM1	72.66		0.61	480	224	0.18	0.06	0.07
	CR5-B	69.74		0.49	800	290	0.12	0.04	0.04
	S3-TM2	69.65		0.56	1500	292	0.16	0.05	0.05
Notre-	S1-TM3	68.29		0.55	600	323	0.11	0.04	0.04
Dame-des-	S2-TM4	65.28		0.50	1100	391	0.14	0.03	0.04
Neiges	CR8-A	65.20	Intermédiaire	0.44	900	393	0.08	0.04	0.04
	CR10-B	63.83		0.50	700	424	0.11	0.04	0.04
	CR11-A	62.20		0.48	700	461	0.11	0.02	0.02
	CR13-A	59.64	Infáriouro	0.60	425	507	0.15	0.04	0.05
[ [	S1-TM6	59.27	interieure	0.56	130	513	0.13	0.02	0.05

 Tableau 7 - 3 : Comparaison des caractéristiques de compression pour les deux sites

Site	Échantillon	Élévation	Unité	Perméabilité (k <sub>o</sub> )	e.	C.	Relation
one		(m)	•	(m/s)	-0	-ĸ	c <sub>k</sub> - e <sub>0</sub>
Isle-Verte	S2-TM1	19.26 à 19.21	supérieure	5.08E-11	0.54	0.67	c <sub>k</sub> =1.3*e <sub>0</sub>
	S4-TM4	6.03 à 5.92	intermédiaire	3.21E-10	0.78	0.53	$c_k = 0.7 * e_0$
	S2-TM6	-1.17 à -1.275	inférieure	3.17E-10	0.94	0.66	$c_k = 0.7 * e_0$
Notre-Dame-des- Neiges	S2-TM1	72.66 à 72.54	supáriouro	1.40E-09	0.61	0.30	$c_k = 0.5 * e_0$
	S1-TM3	68.32 à 68.26	superieure	8.50E-10	0.55	0.18	c <sub>k</sub> =0.32*e <sub>0</sub>
	CR10-B	63.87 à 63.79	intermédiaire	1.47E-10	0.50	0.41	c <sub>k</sub> =0.83*e <sub>0</sub>
	S1-TM6	59.18 à 59.12	inférieure	2.37E-10	0.56	0.46	$c_k = 0.8 * e_0$

Tableau 7 - 4 : Comparaison des propriétés hydrauliques pour les deux sites

Tableau 7 - 5 : Comparaison des propriétés géométriques des tubes de grand diamètre utilisés dans ce projet et du tube de l'échantillonneur Laval (La Rochelle et al., 1981)

Types de tube	Longueur (mm)	Diamètre intérieur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Épaisseur de paroi (mm)	angle de coupe α (°)	Segment α (mm)	ICR (%)	А <sub>r</sub> (%)	B/t
127mm mince	1000	120.8	127	3.1	6	25.4	0	10.5	41
127mm épais	1000	120.8	133.5	6.35	6	25.4	0	22.1	21
Échantillonneur Laval	660	208	218	5	5	60	0	9.8	43.6



Figure 7 - 1 : Relation w<sub>L</sub> – I<sub>P</sub> pour les échantillons des deux sites à l'étude. Limites pour les argiles Champlain selon Leroueil et al. (1983)



Figure 7 - 2 : Représentation de l'activité pour les échantillons des deux sites à l'étude. Limites pour les argiles Champlain selon Leroueil et al. (1983)



Figure 7 - 3 : Comparaison des familles d'ouverture de pores pour les unités supérieures et inférieures de chacun des deux sites d'étude



Figure 7 - 4 : Comparaison de la structure interne au MEB des unités supérieures et inférieures de chacun des deux sites d'étude



Figure 7 - 5 : Diverses relations entre l'indice de plasticité (I<sub>p</sub>), la fraction argileuse (CF), la capacité d'échange cationique (CEC) et la surface spécifique totale (SSA) pour différents sols (modifiée de Locat et al., 2003)



Figure 7 - 6 : Relation entre l'activité des sols (A<sub>c</sub>) et la surface spécifique des argiles (S<sub>c</sub>) déterminée par la méthode du bleu de méthylène (modifiée de Locat et al., 2003)



Figure 7 - 7 : Corrélation entre l'indice de plasticité et le rapport S<sub>uUU</sub>/N<sub>60</sub> (Stroud, 1974)



Figure 7 - 8 : Relation entre la résistance au cisaillement non drainé déduite des essais SPT et les différents profils de résistance au cisaillement non drainé obtenus suite aux essais pressiométriques, aux essais triaxiaux CIU, aux piézocône et piézocône sismique et aux essais scissométriques pour le site de l'Isle-Verte



Figure 7 - 9 : Relation entre la résistance au cisaillement non drainé déduite des essais SPT et les différents profils de résistance au cisaillement non drainé obtenus suite aux essais triaxiaux CIU, aux piézocône et piézcône sismique et aux essais scissométriques pour le site de Notre-Dame-des-Neiges



Figure 7 - 10 : Relation entre S<sub>uV</sub>/σ'<sub>v0</sub> et S<sub>uV</sub>/σ'<sub>p</sub> en fonction de l'indice de plasticité pour les sols des deux sites d'étude par rapport aux argiles de l'est du Canada et du Japon (modifié de Leroueil & Hight, 2003)



Figure 7 - 11 : Profils de la résistance en pointe (qt) et de la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol (Vs) obtenue par différentes méthodes de calcul à partir du piézocône et pour la mesure réelle sur le terrain pour le piézocône CM-03 au site de l'Isle-Verte



Figure 7 - 12 : Profils de la résistance en pointe (qt) et de la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol (Vs) obtenue par différentes méthodes de calcul à partir du piézocône et pour la mesure réelle sur le terrain pour le piézocône CM-05 au site de Notre-Dame-des-Neiges



Figure 7 - 13 : Modules à petites déformations (G<sub>max</sub>) en fonction des différentes unités de sol du site de l'Isle-Verte



Figure 7 - 14 : Modules à petites déformations (G<sub>max</sub>) en fonction des différentes unités de sol du site de Notre-Dame-des-Neiges



Figure 7 - 15 : Relation entre la pression limite (P<sub>L</sub>) déduite d'essais pressiométriques de type Ménard et la résistance au cisaillement non drainé, en fonction du paramètre β'. Pour les essais de la présente étude, les pressions limites étaient connues et les résistances au cisaillement non drainé sont estimées pour différentes valeurs de β' (modifiée de Leroueil et al., 1983).



Figure 7 - 16 : Relation générale entre l'indice de compression, l'indice des vides naturel et la sensibilité incluant les résultats du projet de recherche (modifiée de Leroueil et al., 1983)



Figure 7 - 17 : Relation entre l'indice des vides naturel et l'indice de compression pour les sols des deux sites à l'étude



Figure 7 - 18 : Synthèse des essais triaxiaux CIU consolidé à la contrainte effective verticale en place et paramètres de résistance moyens pour l'enveloppe de résistance



Figure 7 - 19 : Relation entre l'indice de variation de perméabilité c<sub>k</sub> et l'indice des vides naturel e<sub>0</sub> (modifiée de Leroueil & Hight, 2003)

# Chapitre 8 Conclusion

## 8.1 Conclusion du projet

#### 8.1.1 Rappel des objectifs initiaux

Le projet visait la caractérisation géotechnique des sols argileux de la région du Bas-Saint-Laurent. Les sites de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges ont été retenus pour cette caractérisation. Celle-ci a pour but de vérifier si les corrélations établies pour les argiles de la mer de Champlain (Leroueil et al., 1983 et Locat et al., 2003) peuvent également s'appliquer aux argiles du secteur Isle-Verte – Trois-Pistoles et de fournir des informations au MTMDET afin de faciliter les futures études géotechniques dans la région. Différents essais de terrain et de laboratoire ont mené à l'établissement d'un portrait global de ces sols et à des pistes de réponse quant à la mise en place de ces sols argileux.

#### 8.1.2 Portrait global des résultats

#### 8.1.2.1 Propriétés physico-chimiques et minéralogiques

Les essais physico-chimiques et minéralogiques montrent que ces sols argileux du Bas-Saint-Laurent s'inscrivent relativement bien dans les relations et corrélations qui ont été développées pour les argiles de la mer de Champlain par Leroueil et al. (1983) et Locat et al. (2003). La salinité joue un rôle important au niveau des limites de consistance, principalement au site de Notre-Dame-des-Neiges, où certaines relations sont influencées par le lessivage, qui y est beaucoup plus important qu'à l'Isle-Verte. À ce site, la salinité varie entre 15,7 et 28,6 g/l, tandis qu'elle varie entre 1,5 et 3,8 g/l à Notre-Dame-des-Neiges, de l'unité supérieure à inférieure. De plus, il ne semble pas y avoir de différences de caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques entre les différentes unités d'un même site, et même entre les deux sites d'étude. On peut noter cependant que ces argiles du Bas-Saint-Laurent contiennent plus de carbonates que les argiles de la mer de Champlain. Les principales phases minéralogiques sont l'illite et la chlorite pour la phase argileuse, et le quartz, les feldspaths, la calcite et des amphiboles pour les minéraux primaires. Les analyses granulométriques montrent que la moyenne du pourcentage de particules inférieures à 2 µm des deux sites est sensiblement le même, autour de 45 %. Toutefois, la fraction argileuse de l'unité supérieure à Notre-Dame-des-Neiges diminue graduellement de 66 à 33 % jusqu'à l'unité intermédiaire, ce qui ne semble pas être le cas à l'Isle-Verte. Davantage d'analyses granulométriques au site de l'Isle-Verte permettraient également d'être plus précis sur la granulométrie de ce site. Pour les deux sites, les teneurs en eau sont très faibles, et tendent à augmenter légèrement avec la profondeur, particulièrement dans l'unité inférieure. Le site de l'Isle-Verte montre des indices de plasticité entre 19 et 25 % sur l'ensemble du dépôt. Ces indices de plasticité sont plus élevés qu'au site de Notre-Dame-des-Neiges, où ceux-ci varient entre 12 et 17 % dans l'unité supérieure, entre 8 et 13 % dans l'unité intermédiaire et entre 7 et 10 % dans l'unité inférieure. Ceci semble être principalement dû au lessivage, puisque la salinité est de 1,5 à 3,8 g/l à Notre-Dame-des-Neiges et de 15,7 à 28,6 g/l à l'Isle-Verte, tel que mentionné ci-haut. Il y a toutefois une différence d'indice de plasticité entre la moitié supérieure et la moitié inférieure de l'unité supérieure à Notre-Dame-des-Neiges. En effet, la moitié supérieure montre des indices de plasticité de 25 %, tandis que la moitié inférieure montre plutôt des valeurs de l'ordre de 12 à 17 %. Le reste du dépôt montre des indices de plasticité relativement faibles, de l'ordre de 7 à 13 également. Ceci pourrait être dû à une oxydation de la partie supérieure du dépôt qui est très drainée. De plus, les indices de liquidité sont près de 0 dans l'unité supérieure, ce qui témoigne d'une consolidation importante. Dans l'unité inférieure, les valeurs sont plus élevées et peuvent atteindre 0,8.

Les résultats de tomodensitométrie montrent que le sol des unités inférieures est laminé, ce qui n'est pas le cas pour les unités supérieures et intermédiaires qui montrent plutôt une texture massive et une présence plus importante, mais aléatoire, de graviers. Ceci laisse présumer qu'une réavancée glaciaire aurait pu déplacer une masse de sol argileux (unités supérieures et intermédiaires) par-dessus les sédiments fins déjà présents (unité inférieure). Selon Hétu (1998), cette réavancée glaciaire se serait produite entre 12 400 et 12 000 ans B.P. Il semblerait que le gel dû à cette masse glaciaire ait influencé le comportement et les propriétés physiques et mécaniques de cette masse de sol argileux, notamment quant à sa compressibilité. D'ailleurs le transport de la masse argileuse aurait été possible dans un environnement où le glacier était semiflottant, ce qui pourrait expliquer pourquoi l'unité inférieure est à peu près normalement consolidée. Il y a tout de même un manque d'informations qui empêche de se prononcer définitivement sur le processus de mise en place de ces unités de sol.

Les résultats des essais de porosimétrie au mercure et des analyses d'échantillons au microscope à balayage électronique donnent quelques indications supplémentaires sur la structure interne de ces sols. Les unités supérieures des deux sites ne possèdent qu'une seule famille de micro-pores, d'un diamètre de 0,1 µm (Isle-Verte) et de 0,2 µm (Notre-Dame-des-Neiges). L'unité inférieure au site de l'Isle-Verte indique la présence de macro-pores d'environ 0,6 µm de diamètre, en plus des micro-pores, ce qui signifie un sol un peu plus compressible. La structure interne semble également un peu plus ouverte que pour tous les autres échantillons analysés. Ceci n'est pas observé au site de Notre-Dame-des-Neiges. La structure interne est très compacte et fermée, ce qui est cohérent avec la forte surconsolidation causée par le poids des unités supérieures sur ce site.

#### 8.1.2.2 Propriétés mécaniques

Il est possible de faire un parallèle entre l'essai SPT et la résistance au cisaillement non drainé, à défaut de pouvoir utiliser l'essai scissométrique dans les unités supérieures et intermédiaires. Un rapport  $S_{uUU}/N_{60}$  de 5 permet d'obtenir des profils de résistance au cisaillement qui se rapprochent des profils de  $S_u$  déduits du piézocône et du pressiomètre. L'utilisation des indices  $N_{60}$  permet un meilleur accord entre les différents profils, mais ces profils ne fournissent qu'une approximation grossière de la résistance au cisaillement non drainé et ne doivent pas être utilisés pour dresser un

portrait précis de la résistance au cisaillement non drainé des unités supérieures et intermédiaires. D'ailleurs, ces relations ne s'appliquent pas dans les argiles sédimentaires de l'est du Canada, tout comme pour l'unité inférieure de ces sites d'études.

À l'Isle-Verte, les valeurs moyennes de résistance au cisaillement non drainé dans l'unité inférieure obtenues par les deux profils de scissomètre de chantier sont de 67 kPa en F1 et de 51 kPa en F2. Les valeurs obtenues en F2 sont toutefois très dispersées comparativement à celles du scissomètre en F1 où les valeurs montrent peu de dispersion. Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé augmentent légèrement avec la profondeur. À Notre-Dame-des-Neiges, les profils scissométriques réalisées lors de la campagne de 2012 aux forages C1-1 et C1-2 donnent respectivement des valeurs moyennes de 113 kPa et 121 kPa. Ces résultats indiquent que la résistance au cisaillement non drainé mesurée au scissomètre de chantier dans l'unité inférieure est près de deux fois plus élevée au site de Notre-Dame-des-Neiges qu'au site de l'Isle-Verte, ce qui est principalement dû au fait que la contrainte effective verticale à une profondeur donnée sont beaucoup plus élevées à Notre-Dame-des-Neiges qu'à l'Isle-Verte. Tout comme à l'Isle-Verte, la résistance augmente légèrement avec la profondeur dans l'unité inférieure.

Les paramètres N<sub>kT</sub> et N<sub> $\sigma$ T</sub> utilisés pour l'essai au piézocône sont respectivement de 18 et 3,4, et ce pour les deux sites d'étude. Cette valeur de N<sub>kT</sub> est élevée, mais elle semble la plus justifiable à partir des données disponibles. Il s'agit donc d'un point auquel il faudra porter attention dans les recherches futures. De plus, la valeur de 3,4 pour le paramètre N<sub> $\sigma$ T</sub> provient de Demers & Leroueil (2002), étant donné que les valeurs de pression de préconsolidation qui pourraient être déduites des essais oedométriques ne permettent pas de stipuler sur un paramètre particulier. Rien ne permet également de définir des paramètres différents en fonction des différentes unités, principalement dû au fait qu'une valeur de S<sub>u</sub> ne peut être déterminée au scissomètre de chantier dans les unités supérieures et intermédiaires. Typiquement, les valeurs du rapport B<sub>q</sub> varient entre 0 et 0,3 pour l'unité supérieure, augmentent jusqu'à environ 0,6 dans l'unité intermédiaire et varient entre 0,8 et 1,0 dans l'unité inférieure.

Malgré les différences de propriétés mécaniques entre les différentes unités, il n'y a pas de grandes variations dans les vitesses de propagation des ondes de cisaillement. À l'Isle-Verte, les vitesses obtenues par mesures réelles sont légèrement plus faibles dans l'unité inférieure avec une vitesse moyenne de 226 m/s par rapport aux unités supérieure et intermédiaire, qui présentent des V<sub>s</sub> moyennes respectives de 270 et 278 m/s. La différence est d'environ 45 à 50 m/s. Par contre, les vitesses mesurées directement sur le terrain au site de Notre-Dame-des-Neiges ne montrent pas de différence entre les différentes unités. La vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement dans l'unité supérieure est de 285 m/s, ce qui est semblable aux valeurs mesurées au site de l'Isle-Verte. Il y a par la suite une légère augmentation de celle-ci due à une zone de consistance plus raide vers le bas de l'unité supérieure est semblable à celle de l'unité supérieure, voir même légèrement supérieure avec une valeur moyenne de 290 m/s. Cette valeur élevée peut être due aux contraintes verticales effectives qui sont plus élevées qu'à l'Isle-Verte

pour une profondeur donnée. Ces mesures de V<sub>s</sub> sont utilisées pour déterminer le module de cisaillement à petite déformation, G<sub>max</sub>. Pour l'Isle-Verte, la valeur moyenne des modules à petites déformations pour l'unité supérieure est de 162 MPa, de 160 MPa pour l'unité intermédiaire et de 101 MPa pour l'unité inférieure. Les modules sont relativement les mêmes dans les unités supérieure et intermédiaire et l'unité inférieure possède des G<sub>max</sub> plus faibles. Pour Notre-Damedes-Neiges, la valeur moyenne des modules à petites déformations pour l'unité supérieure est de 192 MPa, de 255 MPa pour l'unité intermédiaire et de 185 MPa pour l'unité inférieure. Contrairement au site de l'Isle-Verte où il y a clairement une diminution des modules entre les unités supérieure et inférieure, le site de Notre-Dame-des-Neiges ne présente pas de différence marquée dans les valeurs de modules de cisaillement à petites déformations et il y a une zone plus résistante à la base de l'unité supérieure où les modules sont plus grands. Notons que G<sub>max</sub> dans l'unité inférieure est plus élevé à Notre-Dame-des-Neiges qu'à l'Isle-Verte, ce qui semble dû au fait que dans les deux cas, le sol est normalement consolidé, mais que les contraintes effectives verticales sont plus élevées à Notre-Dame-des-Neiges qu'à l'Isle-Verte.

L'uitlisation d'un paramètre  $\beta$ ' variant entre 10 et 12,5 permet d'estimer une valeur de résistance au cisaillement non drainé à partir des pressions limites déduites des essais pressiométriques, comme Leroueil et al. (1983) l'avaient trouvé pour d'autres argiles raides de l'est du Canada. L'utilisation de cet appareil dans l'unité inférieure nécessiterait un  $\beta$ ' plus petit, étant donné la différence du degré de surconsolidation. Il s'agit tout de même d'une approximation afin d'obtenir une résistance au cisaillement non drainé d'un même ordre de grandeur. Des valeurs de S<sub>u</sub> au scissomètre seraient nécessaires afin d'obtenir une valeur plus précise de  $\beta$ '.

Les courbes de consolidation obtenues des divers essais oedométriques ne montrent pas l'allure typique de celles des argiles de la mer de Champlain, mais montrent plutôt l'allure des sols ayant des indices des vides naturels très faibles. La pression de préconsolidation est donc très difficile à obtenir. A l'Isle-Verte, les indices des vides naturels varient entre 0.54 et 0.94, où les indices des vides naturels les plus élevées caractérisent l'unité inférieure. À Notre-Dame-des-Neiges, les indices des vides naturels varient entre 0.44 et 0.61. Contrairement aux échantillons de l'Isle-Verte. les indices des vides de ceux de Notre-Dame-des-Neiges sont à peu près les mêmes peu importe l'unité, et sont en général également plus faibles. Pour ce qui est des indices de compression, le site de l'Isle-Verte montre des valeurs moyennes de C<sub>c</sub> de 0,17 pour l'unité supérieure, de 0,21 pour l'unité intermédiaire et de 0,25 pour l'unité inférieure. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, les valeurs moyennes de C<sub>c</sub> sont de 0,14 pour l'unité supérieure, de 0,11 pour l'unité intermédiaire et de 0,14 pour l'unité inférieure. Pour ce qui est des indices de recompression, le site de l'Isle-Verte montre des valeurs moyennes de C<sub>s</sub> de 0,07 pour l'unité supérieure, de 0,05 pour l'unité intermédiaire et de 0,06 pour l'unité inférieure. Le site de Notre-Dame-des-Neiges montre des valeurs moyennes de C<sub>s</sub> de 0,04 pour l'unité supérieure, de 0,03 pour l'unité intermédiaire et de 0,03 pour l'unité inférieure. Ces sols du Bas-Saint-Laurent présentent donc une très faible compressibilité. La relation  $e_0 - C_c - S_t$  indique que  $C_c$  augmente avec l'indice des vides selon la relation  $C_c = 0,31e_0 - 0,03$ .

Les essais triaxiaux CIU ont permis de définir un profil de résistance au cisaillement non drainé à des déformations variant entre 12,9 et 15,0 % et de définir des paramètres de résistance pour l'enveloppe de résistance. Au site de l'Isle-Verte, l'angle de frottement  $\phi$ ' varie entre 26,5 et 28,5° et la cohésion entre 8 et 16 kPa. Les paramètres représentatifs sont une cohésion c' = 9 kPa et un angle de frottement  $\phi' = 28^\circ$ , pour l'ensemble des essais. À Notre-Dame-des-Neiges, l'angle de frottement 6' varie entre 27 et 29.5° et la cohésion entre 11 et 43 kPa (à l'exception des deux essais S1-TM1 et S2-TM6 qui semblent erronés). Les paramètres représentatifs sont une cohésion c' = 12 kPa et un angle de frottement  $\phi$ ' = 29°. Les résultats de ce site montrent une dispersion plus importante des cheminements de contraintes comparativement aux résultats des échantillons de l'Isle-Verte. Les deux sites sont mis en relation en utilisant une enveloppe de résistance commune, dont les paramètres sont un angle de frottement  $\phi' = 29^{\circ}$  et une cohésion c' = 10 kPa, ce qui est représentatif des deux sites et des trois unités. À partir des données disponibles, il n'apparaît pas possible de définir des paramètres de résistance différents d'une unité à l'autre, notamment que la variabilité à l'intérieur d'une même unité est aussi grande voir même plus que celle entre les unités. Les unités supérieure et intermédiaire montrent un comportement dilatant, tandis que l'unité inférieure indique un comportement à mi-chemin entre dilatant et contractant. Le résultat de l'essai sur l'échantillon CR13-B ( $\phi$ ' = 29° et c' = 12 kPa) est en accord avec le résultat des essais triaxiaux réalisés par Inspec-sol à une profondeur entre 22.89 et 24.43 m ( $\phi$ ' = 28° et c' = 5 kPa). Plus d'essais permettraient de mieux définir l'enveloppe de résistance pour chacun des deux sites, et en fonction des différentes unités de sol.

Plusieurs indices provenant des divers essais de terrain et de laboratoire montrent que les unités inférieures pourraient être normalement consolidées ou légèrement surconsolidées. Tout d'abord, Les profils de pression de préconsolidation déduits des essais au piézocône sont proches des profils de contrainte effective verticale, montrant des rapports d'OCR de 1,0 (Notre-Dame-des-Neiges) et 1,3 (Isle-Verte). De plus, les rapports  $B_{\alpha}$  obtenus de ces essais varient entre 0,8 et 1,0, ce qui indique également un faible degré de surconsolidation. Les indices de liquidité sont de l'ordre de 0.8. Ensuite, les rapports  $S_{uv}/\sigma'_{v0}$  aux deux sites sont de 0.20, ce qui est plus faible que les valeurs typiques des argiles de la mer de Champlain, mais indigue tout de même un sol à peu près normalement consolidé. Finalement, malgré une structure assez fermée telle qu'observée au MEB. les essais de porosimétrie au mercure effectués sur le sol de l'unité inférieure de l'Isle-Verte indiquent la présence de deux familles d'ouverture de pores. Malgré tout, d'autres indices laissent planer un doute, notamment le comportement dilatant des échantillons soumis aux essais triaxiaux CIU, ainsi que les indices N relativement élevés. Au site de Notre-Dame-des-Neiges, les essais de porosimétrie au mercure indiquent qu'il n'y a qu'une seule famille de micro-pores dans l'échantillon de l'unité inférieure, contrairement à l'Isle-Verte. Les images obtenues au MEB montrent également une structure très fermée, ne présentant pas la structure en nid d'abeille des sols argileux de l'est du Canada. Ceci est également en accord avec le poids volumique très élevé du sol de l'unité inférieure (21,3 kN/m<sup>3</sup>). Il n'est donc pas facile de conclure quant à la nature du sol des unités inférieures et davantage de travaux seraient nécessaires pour aider à la compréhension.

#### 8.1.2.3 Propriétés hydrauliques

La conductivité hydraulique des unités inférieure et intermédiaire se situe à la limite inférieure de celles des argiles de la mer de Champlain avec des valeurs de k<sub>0</sub> de 2 à  $3x10^{-10}$  m/s. L'unité supérieure au site de l'Isle-Verte possède une conductivité hydraulique plus faible, de  $5,1x10^{-11}$  m/s, ce qui est cohérent avec ses très faibles indices des vides et indices de liquidité. Par contre, les valeurs obtenues au site de Notre-Dame-des-Neiges sont plus élevées ( $1,4x10^{-9}$  et  $8,5x10^{-10}$  m/s) et peuvent avoir été causées par des écoulements préférentiels à la périphérie des échantillons. Il est à noter que ces valeurs n'ont pas été corrigées pour les effets reliés à la température. De plus, le rapport entre le coefficient de perméabilité c<sub>k</sub> et l'indice des vides naturel e<sub>0</sub> est plus élevée que celui déterminé pour les argiles de l'est du Canada où c<sub>k</sub> = 0,5e<sub>0</sub>. Les sols de ces deux sites montrent que la variation de perméabilité avec l'indice des vides est plus grande que pour les argiles molles de l'est du Canada, ce qui est peut-être dû au fait que l'indice des vides vides est faible sur les sites étudiés.

#### 8.1.3 Recommandations

La réalisation des essais de terrain s'avère difficile sur ces sites dont la consistance des unités supérieures et intermédiaires complique les travaux d'échantillonnage et de caractérisation mécanique. L'essai scissométrique est inutilisable dans ces unités. L'essai SPT avec analyseur de battage peut permettre d'obtenir une approximation grossière de la résistance au cisaillement non drainé des sols des unités supérieures et intermédiaires, en utilisant un rapport S<sub>uUU</sub>/N<sub>60</sub> de 5. La relation entre la résistance au cisaillement non drainé et l'indice N devrait tenir compte de tous les facteurs et donc être en fonction de (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>. Cette relation est toutefois inutilisable pour les unités inférieures, mais d'autres méthodes sont alors disponibles. L'essai pressiométrique, utilisant un pressiomètre avec avant-trou, peut s'avérer également une bonne solution pour les unités supérieures, en s'assurant de la qualité de cet avant-trou. Des valeurs de  $\beta$ ' entre 10 et 12,5 permettent d'estimer des résistances au cisaillement non drainé qui sont d'un ordre de grandeur similaires à celles déterminées par l'essai au piézocône. L'utilisation du piézocône/piézocône sismique pour obtenir un profil de S<sub>u</sub> nécessite une valeur de N<sub>kT</sub> de 18, mais davantage de travaux permettraient de mieux définir ce paramètre. La valeur de N<sub> $\sigma$ T</sub> de 3,4 peut être utilisée pour obtenir un profil de  $\sigma'_{D}$ , mais cette valeur n'est uniquement fondée que sur la relation déduite par Demers et Leroueil (2002). Ces corrélations nécessitent une confirmation par davantage de travaux afin d'augmenter la quantité de données, et elles doivent donc être utilisées avec prudence et avec conscience de leurs limitations. Les deux méthodes d'échantillonnage utilisées pour ce projet, le carottage PQ<sub>3</sub> et les tubes de grand diamètre, donnent des résultats relativement similaires. Les différences sont faibles entre les deux méthodes et d'autres comparaisons seraient nécessaires pour déterminer si l'une des méthodes est meilleure que l'autre. Le fonçage de tubes de grand diamètre, tout comme la réalisation d'essais au piézocône, demandent toutefois une capacité de poussée très importante dans ces sols très raides, car le frottement généré est beaucoup plus important que dans les argiles typiques de l'est du Canada. Ce frottement limite la quantité de sol récupérable par tubes de grand diamètre et la réalisation d'essais au piézocône à grande profondeur. Au site de l'Isle-Verte, la méthode d'échantillonnage par tubes de grand diamètre semble préférable à celle du carottage, principalement dû au fait que la manipulation des carottes pour le paraffinage impliquent des risques de remaniement des échantillons. Toutefois, cette méthode est à privilégier au site de Notre-Dame-des-Neiges pour les unités supérieure et intermédiaire qui sont encore plus raides que celles de l'Isle-Verte. Seule l'unité inférieure de ce site devrait être échantillonnée par tubes de grand diamètre, pour la même raison que les échantillons du site de l'Isle-Verte.

## 8.2 Ouverture sur la suite du projet

Ce projet a permis d'acquérir une meilleure connaissance des caractéristiques physiques, minéralogiques, mécaniques et hydrauliques des argiles du Bas-Saint-Laurent, et également d'obtenir quelques pistes de réponse quant à la mise en place de ces dépôts. Cependant, il serait nécessaire de poursuivre la collecte de données sur ces sites afin de bâtir une base de données plus importante, de mieux définir les propriétés géotechniques et de pouvoir appuyer davantage les relations définies dans ce rapport. De plus, davantage de travaux permettraient de connaître plus en détails l'étendue de l'unité supérieure très raide à dure que l'on a rencontrée à l'Isle-Verte et à Notre-Dame-des-neiges. Une série d'essais au piézocône serait l'idéal. Il serait également intéressant de faire quelques travaux supplémentaires au site de Trois-Pistoles pour comparer les caractéristiques des dépôts argileux avec celles des deux sites étudiés dans le cadre de ce projet. Le mode de déposition de cette argile massive est toujours une énigme et l'hypothèse avancée nécessite davantage de travaux de terrain et de laboratoire pour être confirmée, notamment en essayant d'obtenir davantage de datations, surtout des unités inférieures, et en caractérisant le contact entre l'unité intermédiaire et inférieure.

# Chapitre 9 Références

ANDRUS, R.D., MOHANAN, N.P., PIRATHEEPAN, P., ELLIS, B.S. & HOLZER, T.L., 2007. *Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance*. Proceedings of Fourth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.

ASTM, 2010. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM D2216-10. ASTM International, West Conshohocken, PA. 7 p.

ASTM, 2011. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM D2435/D2435M-11. ASTM International, West Conshohocken, PA. 15 p.

ASTM, 2011. Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. ASTM D4767-11. ASTM International, West Conshohocken, PA. 14 p.

BNQ, 1981. Sols - Détermination de la limite de liquidité à l'aide du pénétromètre à cône suédois et de la limite de plasticité. BNQ-2501-092, 14 p.

BNQ, 1987. Sols - Analyse granulométrique des sols inorganiques. BNQ 2501-025, 28 p.

BAGUELIN, F., JÉZÉQUEL, J. F. & SHIELDS, D. H., 1978. *The pressuremeter and foundation engineering*. Series on Rock and Soils Mechanics, Vol. 2 (1974/77) No.4, Trans Tech Publications, 612 p.

CLAYTON, C.R.I., MATTHEWS, M.C. & SIMONS, N.E., 1995. *Site investigation*. 2<sup>nd</sup> edition. Department of Civil Engineering, University of Surrey. Willey-Blackwell. 592 p.

COTECCHIA, F., 2002. *Mechanical behaviour of the stiff clays from the Montemesola Basin in relation to their geological history and structure*. Proc. Int. Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore.

CUILLÉ, C., 1976. *Qualité des sables fins auversiens et stampiens de la région parisienne*. Thèse, Université Pierre et Marie Curie, France.

DELAGE, P. & LEFEBVRE, G., 1984. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. Revue Canadienne de Géotechnique. **21** : 21-35.

DEMERS, D. & LEROUEIL, S., 2002. *Evaluation of preconsolidation pressure and the overconsolidation ratio from piezocone tests of clay deposits in Quebec.* Revue Canadienne de Géotechnique. **39** : 174-192.

DIONNE, J.-C., 1977. *La Mer de Goldthwait au Québec*. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, n° 1-2, p. 61-80.

DIONNE, J.-C. & COLL, D., 1995. *Le niveau marin relatif dans la région de Matane (Québec), de la déglaciation à nos jours.* Géographie physique et Quaternaire, vol. 49, n° 3, p. 363-380.

DIONNE, J.-C., 2002. Une nouvelle courbe du niveau marin relatif pour la région de Rivière-du-Loup. Géographie physique et Quaternaire, vol. 56, n° 1, p. 33-44.

DREIMANIS, A., 1962. *Quantitative gasometric determination of calcite and dolomite by using Chittick apparatus*. Journal of sedimentary petrology, vol. 32, n° 3, p. 520-529.

GASPARRE, A., 2005. *Advanced laboratory characterisation of London clay*. Doctoral thesis, University of London. 598 p.

GIESCHE, H., 2006. *Mercury porosimetry : A general (practical) overview.* Particle & particle systems characterization, vol. 23, Issue 1, p. 9-19.

HIGHT, D.W., 1993. *A review of sampling effects in clays and sands*. Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, vol. 28, p. 115-146.

HUNTER, J.A. & CROW, H.L., 2012. Shear wave velocity measurement guidelines for canadian seismic site characterization in soil and rock. Geological Survey of Canada. 227 p.

HÉTU, B., 1998. La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-Saint-Laurent (Québec) : indices d'une récurrence glaciaire dans la Mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. Géographie physique et Quaternaire, vol. 52, n° 3, p. 325-347.

HOUNSFIELD, G. N., 1980. *Computed medical imaging*. Nobel lecture, 1979. Journal of Computer Assisted Tomography. 4 (5), p. 665-674.

HOUSTON, W. N. & MITCHELL, J. K. 1969. *Property interrelationships in sensitive clays*. Proceedings, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, **95** (SM4), pp. 1037 – 1062.

KLUG, H.P. & ALEXANDER, L.E., 1954. *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 716 p.

LA ROCHELLE, P., SARRAILH, J., TAVENAS, F., ROY, M. & LEROUEIL, S., 1981. *Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils.* Revue Canadienne de Géotechnique. **18** : 52-66.

LA ROCHELLE, P., LEROUEIL, S. & TAVENAS, F., 1986. A technique for long-terme storage of clay samples. Revue Canadienne de Géotechnique. **23** : 602-605.

LA ROCHELLE, P., LEROUEIL, S., TRAK, B., BLAIS, L. & TAVENAS, F., 1988a. *Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests*. Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP 977, pp. 715-731.

LA ROCHELLE, P., TAVENAS, F. & LEROUEIL, S., 1988b. Les argiles de l'est du Canada et leur contribution à la compréhension du comportement de l'argile. Revue Canadienne de Géotechnique. **25** : 413-427.

LAPIERRE, C., LEROUEIL, S. & LOCAT, J., 1990. Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay. Revue Canadienne de Géotechnique. **27** : 761-773.

LEROUEIL, S., TAVENAS, F. & LE BIHAN, J.P., 1983. *Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada*. Revue Canadienne de Géotechnique. **20** : 681-705.

LEROUEIL, S., TARDIF, J., ROY, M., LA ROCHELLE, P. & KONRAD, J.-M., 1991. *Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain sea clays*. Revue Canadienne de Géotechnique. **28** : 690-697.

LEROUEIL, S., 1997. *Geotechnical characteristics of eastern Canada clays*. Workshop on soft clays, Yokosuka, Japan. 30 p.

LEROUEIL, S. & HIGHT, D.W., 2003. *Behaviour and properties of natural soils and soft rocks*. Characterisation and engineering properties of natural soils (Tan et al. eds.), Balkema, Vol. 1, p. 29-254.

LOCAT, J., 1976. *Quaternary geology of the Baie-des-Sables/Trois-Pistoles area, Québec; with some emphasis on the Goldthwait sea clays.* Thèse M. Sc. Université de Waterloo, 214 p.

LOCAT, J., 1977. *L'émersion des terres dans la région de Baie-des-Sables/Trois-Pistoles, Québec.* Géographie Physique et Quaternaire. vol. 31, n° 3-4, p. 297-306.

LOCAT, J., 1978. *Le quaternaire de la région de Baie-des-Sables – Trois-Pistoles*. Ministère des Richesses Naturelles, Québec, 64 p.

LOCAT, J., LEFEBVRE, G. & BALLIVY, G., 1984. *Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from Eastern Canada*. Revue Canadienne de Géotechnique. **21** : 530–540.

LOCAT, J. & BÉRUBÉ, M.-A., 1986. L'influence de la granulométrie sur la mesure des carbonates par la méthode du Chittick. Géographie Physique et Quaternaire. vol. 40, n° 3, p. 331-336.

LOCAT, J., TANAKA, H., TAN, T.S., DASARI, G.R. & LEE, H., 2003. *Natural soils: geotechnical behavior and geological knowledge*. In: Characterisation and engineering properties of natural soils, vol 1 (Proc. Singapore Workshop), Balkema. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 3-28

LOCAT, J. & ST-GELAIS, D., 2013. *Nature of sensitive clays from Quebec*. Landslides in Sensitive Clays : From Geosciences to Risk Management, Advances in Natural and Technological Hazards Research. 416 p.

MAYNE, P.W., 2007. NCHRP synthesis « Cone penetration testing state-of-practice ». Transportation Research Board Report Project 20-05. 118 p.

OCCHIETTI, S., PARENT, M., LAJEUNESSE, P., ROBERT, F. & GOVARE, E., 2001. *Late Pleistocene-early Holocene decay of the Laurentide ice sheet in Québec-Labrador*. Dev Quat Sci, 15, 601-630.

QUIGLEY, R.M., 1980. *Geology, mineralogy, and geochemistry of Canadian soft soils : a geotechnical perspective*. Revue Canadienne de Géotechnique. **17** : 261-285.

RAPPOL, M., 1993. Ice flow and glacial transport in Lower St. Lawrence, Québec. Geological Survey of Canada, Paper 90-19, 28 p.

ROBERTSON, P.K. & WRIDE, C.E. (Fear), 1998. *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetrometer test.* Revue Canadienne de Géotechnique. **35** : 442-459.

ROBERTSON, P.K., 2012. *The James K. Mitchell Lecture : Interpretation of in-situ tests – some insights*. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, ISC'4 Brazil, 22 p.

ROSS, D. S., KETTERINGS, Q., 2011. *Recommended methods for determining soil cation exchange capacity*. Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States – Chapter 9, p. 75-86.

ST-GELAIS, D., 1990. La surface spécifique et l'eau de constitution comme indicateurs de la composition minéralogique des sols argileux du Québec. Mémoire de maîtrise, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, 124 pages.

STROUD, M.A., 1974. *The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks*. Proceedings, European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, **2.2**, pp. 367-375.

TAVENAS, F., JEAN, P., LEBLOND, P. & LEROUEIL, S., 1983. The permeability of natural soft clays. Part II : Permeability characteristics. Revue Canadienne de Géotechnique. **20** : 645-660.

WROTH, C.P. & WOOD, D.M., 1978. *The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils*. Revue Canadienne de Géotechnique. **15 (2)** : 137-145.

## Site internet

UNSW Australia. 2014. *Cation Exchange Capacity (CEC),* TerraGIS Layers. [En ligne]. http://www.terragis.bees.unsw.edu.au/terraGIS\_soil/sp\_cation\_exchange\_capacity.html (Page consultée le 17 septembre 2015) World Register of Marine Species. «*Hiatella arctica (Linnaeus, 1767*)». [En ligne]. http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=140103 (Page consultée le 21 octobre 2015)

# Annexes

Les Annexes A et B présentées dans ce rapport sont séparées par site d'étude. Dans chacune des annexes se trouvent les rapports de sondage, les essais de terrain et les essais de laboratoire effectués lors des premières campagnes de terrain sur chaque site et également ceux qui ont été effectués lors de la campagne de 2014-2015 pour le projet de recherche. L'Annexe C contient les quelques informations disponibles du site de Trois-Pistoles et l'Annexe D est constituée des données disponibles afin de mieux cerner l'étendue de l'anomalie stratigraphique et vient en support au Chapitre 6 du présent rapport. Finalement, l'Annexe E contient la méthodologie pour le traitement des données de l'essai triaxial.

# Annexe A Isle-Verte

## Annexe A : Isle-Verte

## Annexe A1 : Rapports de sondages et tomodensitométrie (CT-SCAN)

Annexe A1 - 1 : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2006)	164																		
Annexe A1 - 2 : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2006)	167																		
Annexe A1 - 3 : Rapport de sondage F-03-SW (provenance MTMDET - campagne 2014)	170																		
Annexe A1 - 4 : CT-SCAN TM-01 - axe coronal	173																		
Annexe A1 - 5 : Coupes verticales - CT-SCAN TM-01	173																		
Annexe A1 - 6 : CT-SCAN TM-02 - axe coronal	174																		
Annexe A1 - 7 : Coupes verticales - CT-SCAN TM-02	174																		
Annexe A1 - 8 : CT-SCAN TM-04 - axe coronal	175																		
Annexe A1 - 9 : Coupes verticales - CT-SCAN TM-04	175																		
Annexe A1 - 10 : CT-SCAN TM-05 - axe coronal	176																		
Annexe A1 - 11 : Coupes verticales - CT-SCAN TM-05	176																		
Annexe A1 - 12 : CT-SCAN TM-06 - axe coronal	177																		
Annexe A1 - 13 : Coupes verticales - CT-SCAN TM-06	177																		
Annexe A1 - 14 : Rapport de sondage F-03-PW (provenance MTMDET – campagne 2014)	178																		
Tran	Qué	bec	363	]	RA	PI	<b>20</b>	RT	T DE	SON	DA	GE					Pao	e 1 de :	3
----------	---------------	-----------------	------	--------------------------	-------	--------	-------------------	------	-------------------	---------------------------	--------------------	--------------	-------------------------	---------	--------	-------	----------	-----------	-----------
Locali	sation	générak	e: k	ske Vente , aut-20, Cote	eau-d	es-Én	ables		Do	ssier: 02	7(017)04	4	SONDAGE (1	ype d'a	urrêt)	: F1	(V)		-
Endro	it: C	ulée sud								Date: 20	06-02-20	0		Éléva	tion:	26.82	m (Gé	odésiq	ue)
TYPEST	DÉCHAI	NTILLONNE	UR	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	TYPE	S D'A	rrêt		ESSAIS	3		E: Modu	le pressiométr	ique		Pv:	Poids v	volumiau	ue .
CF: 0	Cuiller	e fendue		Intact	F: A	mêt fo	rcé		N: F	énétration :	standard	St: Sens	ibilité		٠	W:	Teneur	eneau	(%)
CR: 0	Carotti	stationni er	are	Remanié	I: A	mêtin	déter	miné	X Suc: S	cissomètre	(kPa)	AG: Analy	se Granulomé	trique	Ч	WI:	Limite o	de liquid	lité (%)
TA: 1	arière	9		Perdu	V: A	métw	olonta	ire	X Sr. S	icissomètre	(kPa)	C: Cons	olidation		F	Wp:	Limite (	de plasti	icité (%)
AU: A	/rac Autre			Carotte	н: н	etus			PI: F	ermeabline ression lim	(m/s) ite (kPa)	Dr: Dens	ilement ité relative		Ŧ	-	Niveau	d'eau (I	m)
Éle	v.	Piézo-		COUPE GÉOLOGI	QUE		Τ				É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS					
Pro	of.	métrie		Description		C	_	Pro	f. Type	Réc.	N	N1 / N2 / N3	Feedla	Cu	40	80	12	20 1	60
(m	1)			stratigraphique		ətr.	Éta	(m)	) -No	(cm/cm)	RQD	N / RQD	Essais	w	20	40	6	0 8	30
- 2	0.00		Sa	ble fin avec un peu de					-						+				
Ē			gra	vier		e . A													
F,	5 20						$\times$	0.76	<sup>3</sup> CF1	33/61	17	3/7/10							
	1.50		Silt	et argile avec un peu o	de	ии	Þ	1.5	2 CF2	23/61	13	3/4/9	1		Ħ				
2			sat	ble et traces de gravier			Þ	0.00					AC						
ŧ								2.2	CF3	46/61	19	5/7/12	AG		Ħ				
E							$\mathbf{\nabla}$	3.08	5 CF4	33/61	14	4/6/8	1		Ħ				
Ē,						翻	₽	3.8					1						
Ē						##		0.01	CF5	35/61	32	6/12/20							
Ē						80		4.57	CF6	26/61	29	6/11/18	1						
ŧ						11	Ħ	5.33	3			-	1						
E 6						11	$\bowtie$		CF7	33/61	32	4/11/21							
F						211		6.10	CF8	51/61	31	5/10/21	1						
Ę						11	Æ	6.86	3 050	10/01		olapina	1						
Ē						88	$\mathbb{P}$		CF9	43/61	34	6/13/21							
- 8						11	$\mathbb{X}$	7.62	2 CF10	56/61	31	5/10/21			#				
1	8.32		Silt	et arole avec traces d	a	##	Æ	8.38	3 0511	EALPA	24	RIJOITA	1		Ħ				
Ē			gra	vier et sable		88	Þ			54761		anorra							
ŧ								9.14	* CF12	46/61	29	6/11/18							
-10						11		9.91	CF13	61/61	20	4/8/12	AG						
Ē						11	₽	-											
ŧ															#				
E						H		11.4	3 CF14	58/61	21	5/8/13	1		H				
-12						11	F		-				1						
Ę						88													
Ē						10		12.9	5 CF15	35/61	23	5/9/14	1						
-						11	✐						1						
-14						11	1								Ħ				
-						11	$\mathbf{X}$	14.4	8 CF16	18/61	22	5/9/13	]						
Ē						捌	F	1					1		Ħ				
5- 1-						88	1												
-						ĦA		16.0	0 CF17	20/61	22	6/9/13	]		Ħ				
E					- 1	H	F						1		Ħ				
F						11													
-18							$\mathbb{X}$	17.5	3 CF18	10/61	22	4/8/14							
E						詽							]						
-						H	L		_						Ħ				
								19.0	<sup>5</sup> CF19	15/61	29	8/12/17	]		Ħ				
3-	6.82					11	1												

Annexe A1 - 1 : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2006)

Tran	Qué	bec	363	]	RA	P	PC	R	Г DE	SON	DAC	GE				Page 2	de 3
Locali	isation	générak	a : Isle Verte , aut-20	0, Cote	eau-de	s-Ér	able	3	D	ossier: 02	7(017)04	L .	SONDAGE (	Type d'arrêt):	F1 (	V)	
Endro	oit: C	ulée sud								Date: 20	06-02-20			Élévation:	26.82m	(Géod	ésique)
TYPES CF: 0 PS: 1 CR: 0 TA: 1 VR: 1	DÉCHAI Cuillère Piston Carotti Tarière Vrac	NTILLONNE e fendue stationna er	aire ÉTAT DES ÉCHANTILI Intact Perdu Carotte	LONS	TYPE F: Ar I: Ar V: Ar R: Br	SDV mêt fi mêt ir mêt v efus	NRRÊT orcê ndête volont	rminė aire	ESSAI N: 1 X Suc: 5 X Sr: 5 K: 1	S Pénétration Scissomètre Scissomètre Perméabilité	standard (kPa) (kPa) (m/s)	E: Modu St: Sens AG: Analy C: Cons Suv:Cisai	ule pressiométr ibilité se Granulomé solidation illement	rique etrique – F	Pv: P W: T WI: L Wp: L : N	oids volu eneur en imite de l imite de j liveau d'e	mique eau (%) iquidité (%) plasticité (%) eau (m)
AU: /	Autre	Diázo	COUPE GÉO	001			_		PI: I	ression lim	ne (kPa) É(	Dr: Dens	NS ET ESS	AIS			
Pro	ev. of.	métrie	Description	LUGI			+	Dee	<	Dáo		N1 / N2 / N3		Cu 40	80	120	160
<b>(</b> n	n)		stratigraphiq	n Jue		Str.	État	(m	) -No	(cm/cm)	RQD	Rem. sur N / RQD	Essais	W 20	40	60	80
- 2	20.00		Silt argileux avec un sable et traces de or	i peu d	le ,	Y.	U										
Ē			sable et traces de gi	dv ici				20.5	57 CF20	58/61	25	5/9/16	AG				
-22								22.1	0 CF21	26/61	21	4/9/12	-				
-24								23.6	<sup>32</sup> CF22	0/61	20	6/8/12	-				
-26								25.1	<sup>5</sup> CF23	61/61	13	4/6/7	-				
<b>F</b>	0.32		Silt et argile		_	H	A		_						*		
-28			2					26.0	57 CF24	61/61	10	3/4/6	AG		×		
								28.1	<sup>19</sup> CF25	61/61	7	0/3/4			×		
30			Remontée d'argile					29.7	<sup>72</sup> CF26	?/61	5	0/0/5 Info manguante	1				
Ē					ł			31.2	24 CF27	61/61	6	0/2/4	-		×		
-32								32.0	00 PS28	0/61		Échantillon perdu			*		
34								32.7	77 CF29	61/61	6	0/1/5	-		*		
					ļ	11	卜	34.2	<sup>29</sup> CF30	61/61	4	0/0/4	AG	-	Ĵ.		
36								35.8	31 CF31	61/61	7	0/2/5	-				
								37.3	34 CF32	61/61	9	0/4/5					
-38								38.5	36								
	13.18				ł		ľ		CF33	61/61	6	0/2/4	-				

Annexe A1 - 1 (suite) : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2006)

Transp	»rts Jué	bec	202		RA	PP	o	RT	DE	SON	DA	GE					Page 3	de 3	
Localisa	ation	générak	9: I	isle Vente , aut-20, Cot	eau-d	es-Éra	bles		Do	ssier: 027	7(017)04	4	SONDAGE (1	lype d'a	rrêt):	F1 (V)			
Endroit:	Cu	lée sud								Date: 20	06-02-20	0		Élévat	ion: 26	.82m	(Géodé	sique)	
TYPES D	CHAN	TILLONNE	UR	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	TYPE	S D'AF	RÊT		ESSAIS			E: Modu	de pressiométr	rique	Dv	- Doir	de volur	ninua	
CF: Cu PS: Pis CR: Ca TA: Ta VR: Vr	uillère storn s arottie arière ac	fendue stationn er	aire	Intact Remanié Perdu Carotte	F: A I: A V: A R: R	mêt for mêt ind mêt vo kefus	rcé détern lontai	miné ire	N: P Suc: S X Sr: S K: P	énétration : cissomètre cissomètre erméabilité	standard (kPa) (kPa) (m/s)	j St: Sens AG: Analy C: Cons Suv:Cisai	ibilité /se Granulomé olidation llement	trique	• W - W - W - W	: Ten I: Lim p: Lim Nive	ite de li ite de li ite de p eau d'ea	eau (%) quidité ( lasticité au (m)	(%) (%)
AU: AU	utre			COURE CÉOLOGI			<u> </u>		PI: P	ression lim	te (kPa) É	Dr: Dens	ité relative	AIS					
Elev		nétrie		COOPE GEOLOGI	QUE		$\vdash$	-				N1 / N2 / N3	NO ET EOO	A13	40	80	120	160	
(m)				Description stratigraphique		<del>Str.</del>	Était	(m)	-No	Hec. (cm/cm)	RQD	Rem. <del>sur</del> N / RQD	Essais	w	20	40	60	80	
- 40	.00		Si	t et argile avec traces d	9	Ш	ł												
E			Sal	ble		##	$\times$	40.3	9 CF34	61/61	7	0/2/5	AG						
F						111													
E							ł												
-42						111	$\times$	41.9	1 CF35	61/61	7	4/3/4	1						
Ē						111	F		+				1						Ħ
Ē						Ж	Ħ												Ħ
Ē						11	$\times$	43.4	3 CF36	46/61	5	1/0/5	]						
-44			Ca	illoux		W	F						1						
Ę						W													
-18	.37		\ Mo	ontée d'eau	7	1		45.1	9				{						Ħ
È.			Ro	c:Grès	_	()			CDet	160/		RQD non							
-46			for	anzo-leiospathique gris icé à gris verdâtre.		X			CH3/	160		calculé							
19	.97		Fir	du forage					_										
E *0				i du lorage															
F.																			
-48																			
È																			
Ę																			
F.																			
F																			
Ē																			
Ę																			
E <sub>en</sub>																			
-																			
Ē																			Ħ
ļ.																			
E_54																			H
F																			
E																			Ħ
Ē																			Ħ
56																			Ħ
Ē																			Ħ
E																			Ħ
Ē																			
-58																			H
E																			
È																			
E																			
F																			H

Annexe A1 - 1 (suite) : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2006)

Transport	ébec	3 C3	RAI	PP	OF	łТ	DE	SON	DAC	GE				Pag	e 1 de 3
Localisatio	n général	e: Isle Vente , aut-20, Cot	teau-des-	Éral	bles		Do	ssier: 027	(017)04	l .	SONDAGE (T	ype d'a	rrêt): F2	(V)	
Endroit: C	Culée nor	d (pile future)						Date: 200	06-03-03	1		Élévat	ion: 25.7	9m (Gé	odésique)
TYPES DÉCH	ANTILLONNE	RUR ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	TYPES	D'AR	rêt		ESSAIS			E: Modu	le pressiométr	ique	Pv:	Poids w	olumique
CF: Cuillé DS: Distor	re fendue n stationn	aire Intact	F: Arrê	t for	θÓ		N: P	énétration s	standard	St: Sens	bilité		• W:	Teneur	en eau (%)
CR: Carot	tier	Remanié	I: Arrê	it ind	létermi	iné	X Suc: S	cissomètre	(kPa)	AG: Analy	se Granulomé	trique		Limite d	e liquidité (%)
TA: Tarièr	re	Perdu	V: Arrê	t vol	lontaire	9	X Sr. Si	cissomé tre	(kPa)	C: Cons	olidation		⊢ Wp:	Limite d	e plasticité (%)
ALL: Autre		Carotte	H: HET	us			PI PI	ression limi	(m/s) te (kPa)	Dr: Dons	ilement itó relativo		¥ ÷	Niveau	beau (m)
Élov	Piéz o-	COUPE GÉOLOG	QUE						É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS			
Prof.	métrie	Description		_		Prof	Type	Réc	N	N1 / N2 / N3		Cu	40 8	0 12	0 160
(m)	03-24	stratigraphique	s	itr.	État	(m)	-No	(cm/cm)	RQD	Rem. sur N / RQD	Essais	w	20 4	0 6(	0.80
30.79	2006				$\vdash$		+								
Ē															
-4															
ŧ.															
Ē															
È .															
2													+	+++++	
E															
ŧ.															
Ē															
0 25.79	*	Mating and a second			$\square$										
E 0.00		sable													
24.79		01				0.76	CE1	48/61	9	2/3/8					
- 1.00		sable et gravier	e	h	$\ominus$			40.01	5	2010					
E,	6444	2	ŕ,	KI	$\times$	1.52	CF2	30/61	37	6/15/22					
÷ -	- <del>Ÿ</del> -		1	И	Ð	2.29	050			ables					
E			Ľ.	И	$ \land$		GF3	33761	22	3///15					
È .			1	H	$\times$	3.05	CF4	41/61	23	4/8/15	1				
Ē,			2	Ŋ	$\ominus$	3.81									
E *	·		ł	F.	X	0.01	CF5	46/61	19	4/7/12					
ŧ			4	h	$\mathbf{\nabla}$	4.57	CF6	56/61	21	5/8/13					
E				ΚJ	$\ominus$	5.00					10				
È.			1	H1	$\times$	0.00	CF7	58/61	19	4/7/12	AG				
E			1	M	$\bigtriangledown$	6.10	CE8	54/61	21	4/8/13					
ŧ			1	K	$\triangle$		5.5								
E			ł	H	Х	6.86	CF9	48/61	21	5/8/13					
ŧ,				1,	$\bigtriangledown$	7.62	CEro	APIE		EID/40				+++++	+++++
E				M)	$\wedge$	_	OFIU	407.01	20	urar 10					
F				Ŋ	Х	8.38	CF11	43/61	24	4/8/16					
E				H.	Ħ	9.14	05.00	10/01		alartia a					
E			1	H	A		GF12	46/61	24	4/10/14					
-10			1	H	Х	9.91	CF13	41/61	21	6/8/13					
E			X		$\uparrow$				$\vdash$						
F			k	14										+++++	
E			×	K)	$\mathbf{X}$	11.43	3 CF14	61/61	14	4/5/9	1				
12				K)	$\cap$										
E			i.	K											
-			1	M		12.95	CE15	61/61	10	4/8/11	AG				
F			1	H	$\cap$		0110	01101	19						
-14			ł												
F				N		14.48	CErc.	Rtiet	10	Alcie					
-				ИI	$\sim$		GF16	61761	13	4/5/6			1		

Annexe A1 - 2 : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A1 - 2 (suite) : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2006)

Transport	ébec	303	1	RA	PP	o	RI	T DE	SON	DA	GE				Pi	age 3 de	3
Localisation	ı général	9: I	sle Vente , aut-20, Cot	eau-de	s-Éral	bles		Do	ssier: 02	7(017)04	4	SONDAGE (T	ype d'a	rrêt): E	2 (V)		
Endroit: C	ulée nor	d (pile	e future)						Date: 20	06-03-03	3		Élévat	ion: 25.7	9m (C	éodésio	gue)
TYPES DÉCHA CF: Cuillèr	NTILLONNE Te fendue	UR	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	TYPE E: A	SD'AR	RÊT		essais N: P	énétration :	standard	E: Modu St: Sensi	le pressiométri bilité	ique	Pv: • W:	Poids Tene	volumiq ur en ea	ue u (%)
PS: Piston CP: Carott	stationn	aire	Remanié	I: A	mêt ind	léten	miné	× Suc: S	cissomètre	(kPa)	AG: Analy	se Granulomé	trique	H WI:	Limite	e de liqui	dité (%)
TA: Tarièn	8		Perdu	V: A	mêt vol	lonta	ire	X Sr: S	cissomètre	(kPa)	C: Cons	olidation		⊢ Wp:	Limite	de plas	ticité (%)
VR: Vrac			Carotte	R: R	efus			K: P	erméabilité	(m/s)	Suv: Cisail	lement		₹ :	Nivea	u d'eau	(m)
AU: Autre								PI: P	ression lim	ite (kPa)	Dr: Densi	ité relative	AIC				
Elev.	Plezo- mótrio		COOPE GEOLOGI	QUE		-	_			E	N1 / N2 / N3	NOELEOO	AI 5	40 8	0 1	120	160
(m)	03-24		Description stratigraphique		Str.	État	Prof (m)	f. Type ) -No	Réc. (cm/cm)	N RQD	Rem. sur N / RQD	Essais	w	20 4	<u>й</u>	60	80
-	2006	Sa	ble silteux graveleux			$\times$	34.8	5 CF23	60/60	19	7/7/12					+	
E		aw	ec un peu d'argile		1	P											
-36 -10.46				-	КU									_			_
36.25		QU QU	ic : Gres artzo-feldspathique gris	ł	$\sim$	H	36.2	5 CR1	37/37	0							
E		for	ncé à gris verdâtre.	E	X			CR2	59/78	24							
Ē				Į		h	37.4	0									
-38				E	$\gg$			CR3	125/ 132	42							
-12.93																	
38.72		Fir	1 du forage														
ŧ																	
-40																	
E																	
Ę																	
E																	
-42																	
E																	
Ę																	
Ē																	
44														_			
F																	
E																	
ŧ																	
46																	
=																	
Ē																	
ŧ																	
48																	
-																	
50																	
1																	
5																	
-52																	
8																	
uniter in the second seco																	
54																	
000																	
S-																	

Annexe A1 - 2 (suite) : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2006)

Transpor QU	ts iébec		RAP	PC	DR	T DI	E (	SON	DA	GE						Pag	je 1 de	e 3	
Localisation	n général	e : Bas Saint-Laurent - Se	ecteur argile	dure		0	)oss	ier: 032	(032)1	2	9	SONDAG	E:	F-03	3-SW				
Endroit: P	-16356, /	A20/Côteau-des-Érables, Is	le-Verte	Da	te de d	lébut du s	ond	lage: 201	4-07-1	7	Prof. fin	(type arri	it):	29.5	54 m (	R)			
TYPES D'ÉCHA	NTILLONNE	UR ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	ESSAIS			E	E: N	Nodule pre	ssiome	étrique P	v: Poids volu	umique			Coo	rdon	nées	(m):	101
PS: Piston s	stationnai	ire Intact	N: Pén	étrat	ion sta	ndard	St: S	Sensibilité	anular	● W nótriana ○ W	l: Teneur en	reau (%) dec L (%)			011		J65 (2	Lone	. Iaj
CR:Carottie	er	Perdu	X Srv: Scis	som	etre (k ètre (k	Pa) / Pa) (	0:0	Consolidati	on	HW	/I: Limite de l	liquidité (	, %)			531	5711.	00 n	n (Y)
VR:Vrac I	N: Indéte	miné Carotte	K: Per	méat	vilité (n	n√s) 1	. 0	Cisaillemer	nt	– v	/p: Limite de	plasticité	(%	)	Élév	4/ ation	2342	00 n 34 n	л(X) п(Z)
AU:Autre [	DE: Délay	né Autre	PI: Pre	ssion	limite	(kPa) [	Dr: D	Densité rel	ative	<b>.</b>	Niveau d'e	eau (m)			(géod	ésiqu	e)		
Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOG	IQUE				L.	Día	É	CHANTILLO	NS ET ESS	SAIS		40			400	40	_
Prof.	metrie	Description	Str.	Ħ	Prof.	Type-No Calibra	ŝ	(cm/cm)	N	Rem. sur	Essai	s	Su	40	8		120	16	0
26.34		stratigraphique		÷Ë	(m)	Calibre	Sout	(%)	RQU	N / RQD	et not	es	W	20	4	0	60	80	)
- 0.00		Forage destructif										-							
F												_	Ħ	H					
ļ.												_	Ħ	Ħ					
ţ.														Ħ					
t i													Ħ						
- 2												F	╞						
Ł													┢						
Ł													$\square$						
F												-	$\square$						
F												-	$\square$						
- 4	4																		
ļ.																			
ţ.																			
ţ.														Ħ					
t																			
6																			
Ł	6 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
19.55													$\square$						
6.79		Argile silteuse avec traces sable et gravier, gris-brun à	de		6.79	TM-01		48/48 (100%)				_							
F		gris, ferme.					1		1			_							
F													$\square$						
- *												F							
Ę.												-	Ħ	H					
F													Ħ	Ħ					##
-													Ħ						##
0.440													Ħ						
-10					9.84	TM-02		51/65				þ	Ħ						
-					-		$\left\{ \right\}$	(10/6)	-				Ħ						
													╞						
													$\parallel$						
0.000													$\mathbb{H}$						
-12												F	H					H	
													H						
í.													Ħ						$\square$
Remarques	: Forace	de grand diamètre (Calibre !	SW) pour éch	l nantil	loner d	les tubes	min	ces de 5"	de dia	mètre.	Type	de sonda	i de	For	rage a	u dia	mant		
00000											Équip Type	ement de de marte	e fo au	rage (kg)	e: Died : 63.5	rich I	D-50 (	(Auto	<b>)</b> )
Technicien	: Francoi	s Tremblay, t.t.p.p.	Vérif	ié pa	r: Anto	ny Gagné	in,	g.		Ap	prouvé par:								

Annexe A1 - 3 : Rapport de sondage F-03-SW (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transpor	rts Jébec	R	AP	PC	DR	T DI	E (	SON	DA	GE					Page	2 de	3	
Localisatio	n général	e: Bas Saint-Laurent - Secteur	rargile	dure		0	)oss	ier: 032	(032)1	2	SOND	AGE:	F-03	-sw				
Endroit: F	P-16356, /	A20/Côteau-des-Érables, Isle-Ver	te	Dat	te de d	lébut du s	ond	lage: 201	4-07-1	7	Prof. fin (type a	arrêt):	29.5	4 m (R	8)			
Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOGIQUE							É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS							
Prof.	métrie	Description	Str		Prof.	Type-No	éch.	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem sur	Essais	Su	40	80	1	20	160	1
(m)		stratigraphique	- <b>u</b> .	÷,	(m)	Calibre	snog	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40	i 6	50	80	
t –																		
Ł																		
-14																++		
Ł																		
Ł																		
Ł																		
Ł																		
-16																++		
Ł																$\square$		H
Ł																		
E																$\left  \right $		
E																$\left  \right $		
-18					10.10											++		
E					18.12	TM-03		0/76								$\square$		
F								(0%)								$\square$		
F																$\square$		
E																$\square$		
-20					19.74	TM-04		63/75					+					
F								(84%)								1		
F																H		
F																Ħ		
F																Ħ		
-22																₩		
F																$\square$		
E				///	22.78							$\square$				$\left  \right $		Ħ
E						TM-05		41/75 (55%)							$\square$	$\left\{ \right\}$		H
E				977			1								$\square$	H		
-24												$\square$				++		
E												+				$\left  \right $		
E																$\left  \right  \right $		
E																$\left  \right $		
E																H		
-26												Ħ				₩	$\square$	Ħ
F												Ħ			#	Ħ		
F												Ħ			##	Ħ		Ħ
F					27.00							Ħ			Ħ	Ħ		
È					21.20	TM-06		68/75				Ħ			#	Ħ		
-28								(81%)				Ħ			++++	##		
ļ.												Ħ			#	Ħ		
F												Ħ			##	Ħ		
-					28.86											<u>+++</u>		

Annexe A1 - 3 (suite) : Rapport de sondage F-03-SW (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transpor	Transports RAPPORT DE SONDAGE   Québec Page 3 de 3																	
Localisation	n général	e : Bas Saint-Laurent - Secteur	argile	dure	2	D	oss	ier: 032	032)1	2	SONDA	AGE:	F-03-9	w				
Endroit: P	-16356, /	A20/Côteau-des-Érables, Isle-Ver	te	Dat	te de d	ébut du s	ond	age: 2014	4-07-1	7	Prof. fin (type a	rrêt):	29.54	m (R)				
Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOGIQUE							É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS							
Prof.	métrie	Description	Str	+	Prof.	Type-No	êch.	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem sur	Essais	Su	40	80	12	0	16	0
(m)		stratigraphique	<b>J</b> u.	Ê	(m)	Calibre	snog	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40	6	0	80	)
2.20						TM-07		0/68									Ħ	
29.54		Fin du Forage.					$\vdash$	(0/6)										
-30																		
Ł																		
Ł																		
Ł																		
Ł																		
-32																		
ţ.																		
Ę																		
Ł																		
Ł																		
-34																		+++
Ł																		
Ł																		
Ł																		
Ł																		
-36																		
Ł																		
Ł																		
Ł																		
È .																		
-38																		+++
ţ.																		
t i																		
Ę																		
ţ.																		
-40												H						
-																		
-																		
-42																		
5																		
-																		
1																		
-44																	$\mathbf{H}$	

Annexe A1 - 3 (suite) : Rapport de sondage F-03-SW (provenance MTMDET – campagne 2014)



Annexe A1 - 4 : CT-SCAN TM-01 - axe coronal



Annexe A1 - 5 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-01





Annexe A1 - 7 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-02

Annexe A1 - 6 : CT-SCAN TM-02 - axe coronal





Annexe A1 - 9 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-04

Annexe A1 - 8 : CT-SCAN TM-04 - axe coronal





Annexe A1 - 11 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-05

Annexe A1 - 10 : CT-SCAN TM-05 - axe coronal





Annexe A1 - 13 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-06

Annexe A1 - 12 : CT-SCAN TM-06 - axe coronal



Annexe A1 - 14 : Rapport de sondage F-03-PW (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transpor	rts lébec	R	AP	PC	)R	T DI	E :	SON	DA	GE				P	age 2 d	e 2	
Localisation	n général	e : Bas Saint-Laurent - Secteur	r argile	dure	•	0	oss	ier: 032	(032)1	2	SONDA	GE: F	F-03-F	w			
Endroit: P	-16356,	A20/Côteau-des-Érables, Isle-Ver	te	Da	te de d	iébut du s	ond	lage: 2014	4-07-1	6	Prof. fin (type a	rrêt): 1	14.31	m (R)			
Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOGIQUE							É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS						
Prof.	métrie	Description	C+r		Prof.	Type-No	êch.	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem sur	Essais	Su	40	80	120	16	0
(m)		stratigraphique	ou.	Êta	(m)	Calibre	sno	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40	60	8	D
							0,	40/450									
F						CR-06 PQ3		(32%)					_				
-14																	
- 14.31		Fin du forage.		╞┻			$\vdash$										
F																	
F																	
ţ.																	
-16																	
t l																	
Ł																	
+																	
F																	
F																	
-18																	
t i																	
Ł																	
Ł																	
F																	
-20																	
‡																	
ţ.																	
È.																	
Ł																	
222																	
-																	
F																	
ļ.																	
ļ.																	
ţ.																	
- <b>24</b>																	
16.4																	
8																	
201																	
-																	
-26																	
Date																	
90 st)																	
A VO																	
2 2																H	
100																	
a −28 8-																	
decil																	
8.0																	

Annexe A1 - 14 (suite) : Rapport de sondage F-03-PW (provenance MTMDET – campagne 2014)

### Annexe A2 : Pressions interstitielles (piézométrie)

Le piézomètre installé dans le forage F2 lors de la campagne 2006 n'est plus utilisable. Ces données de piézométrie sont alors les seules pouvant être utilisées afin d'obtenir les pressions instertitielles au site de l'Isle-Verte. Aucun piézomètre n'a été installé lors de la campagne 2014 par manque de temps.

ENDROIT:		Isle Vert	e								
DOSSIER:		027(017	)014								
	Forage No.:		F-2			F-2			F-2		
	Type et No. :		petur4130	T.N.		petur5246			petur5306		
Da	te d'installation:		2006-03-16	1 <u></u> M		2006-03-15			2006-03-15	***	
Profond	leur dans le sol:		4.00			15.10			32.92		
L	ongueur totale:		N/A	I T 🛙		N/A			N/A		
Élé	vation du T.N.:		25.79	]   ]		25.79			25.79		
Élévati	on de la pointe:		21.79	hw 🚦		10.69	]		-7.13		REMARQUES
Éléva	ation du dessus:		N/A			N/ A	<u></u>		N/A		
Cst	e d'étalonnage:		1.00			1.00	]		1.00		
Con	rection d'inertie:		0.00			0.00	<u> </u>	لتشتق	0.00	J	
Date de	Nombre de	Lecture			Lecture			Lecture			
lecture	jours	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	
2006-03-06	-9	44.00	4.49	26.28	215.00	21.92	32.61	365.00	37.21	30.08	Poste 9811 Francois Tremblay
2006-03-18	3	54.00	5.50	27.29	261.00	26.61	37.30	637.00	64.93	57.80	Poste 9811 Francois Tremblay
2006-03-20	5	53.00	5.40	27.19	283.00	28.85	39.54	367.00	37.41	30.28	Poste 9811 Francois Tremblay
2006-03-24	9	41.00	4.18	25.97	251.00	25.59	36.28	366.00	37.31	30.18	Poste 9811 Francois Tremblay

# Annexe A2 - 1 : Lectures des pressions interstitielles pour le forage F2 (provenance MTMDET)

### Annexe A3 : Essais pressiométriques

Annexe A3 - 1 : Résultats de la première série d'essais pressiométriques, dans le forage F2 (provenar	ICE
MTMDET – campagne 2006)	183
Annexe A3 - 2 : Résultats de la deuxième série d'essais pressiométriques, dans le forage F1 (provena	nce
MTMDET – campagne 2006)	183
Annexe A3 - 3 : Essai pressiométique – F1 (6m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	184
Annexe A3 - 4 : Essai pressiométique – F1 (10m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	185
Annexe A3 - 5 : Essai pressiométique – F1 (14m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	186
Annexe A3 - 6 : Essai pressiométique – F2 (4m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	187
Annexe A3 - 7 : Essai pressiométique – F2 (6m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	188
Annexe A3 - 8 : Essai pressiométique – F2 (10m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	189
Annexe A3 - 9 : Essai pressiométique – F2 (14m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	190
Annexe A3 - 10 : Essai pressiométique – F2 (18m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	191
Annexe A3 - 11 : Essai pressiométique – F2 (22m) (provenance MTMDET – campagne 2006)	192

Il y a eu un problème lors du traitement de données des essais pressiométriques. En effet, le fichier de traitement des données de l'essai pressiométrique F1 – 4m est en réalité celui de l'essai pressiométrique F2 – 4m. Il n'est donc pas possible de présenter la courbe pressiométrique pour l'essai F1 – 4m.

	-		F2		-	
Profondeur (m)	4	6	10	14	18	22
Pression limite - PI (bar)	13.8	15.8	14.7	16.6	14.6	18.4
Pression limite - PI (kPa)	1380	1580	1470	1660	1460	1840
Interprétation (PI)	argile très raide	argile très raide	argile très raide	argile dure	argile très raide	argile dure
Module élastique - E (bar)	67.9	74.7	42.4	82	744.7	335.7
Module élastique - E (kPa)	6790	7470	4240	8200	74470	33570
Interprétation (E)	argile raide	argile raide	argile ferme	argile raide	argile dure	argile dure
E/PI	5	5	3	5	51	18
Interprétation (E/PI)	?	?	?	?	surconsolidée	surconsolidée

Annexe A3 - 1 : Résultats de la première série d'essais pressiométriques, dans le forage F2 (provenance MTMDET – campagne 2006)

Annexe A3 - 2 : Résultats de la deuxième série d'essais pressiométriques, dans le forage F1 (provenance MTMDET – campagne 2006)

F1					
Profondeur (m)	4	6	10	14	
Pression limite - PI (bar)	16.5	14.9	17	20.6	
Pression limite - PI (kPa)	1650	1490	1700	2060	
Interprétation (PI)	argile dure	argile très raide	argile dure	argile dure	
Module élastique - E (bar)	564.9	346.3	507.6	677.8	
Module élastique - E (kPa)	56490	34630	50760	67780	
Interprétation (E)	argile dure	argile dure	argile dure	argile dure	
E/PI	34	23	30	33	
Interprétation (E/PI)	surconsolidée	surconsolidée	surconsolidée	surconsolidée	



Annexe A3 - 3 : Essai pressiométique – F1 (6m) (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A3 - 4 : Essai pressiométique - F1 (10m) (provenance MTMDET - campagne 2006)



Annexe A3 - 5 : Essai pressiométique - F1 (14m) (provenance MTMDET - campagne 2006)



Annexe A3 - 6 : Essai pressiométique – F2 (4m) (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A3 - 7 : Essai pressiométique – F2 (6m) (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A3 - 8 : Essai pressiométique – F2 (10m) (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A3 - 9 : Essai pressiométique – F2 (14m) (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A3 - 10 : Essai pressiométique – F2 (18m) (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A3 - 11 : Essai pressiométique – F2 (22m) (provenance MTMDET – campagne 2006)

# Annexe A4 : Essais au piézocône

Annexe A4 - 1 : Sondage au piézocône CPTu1 – F1 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)
Annexe A4 - 2 : Sondage au piézocône C-01 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)195
Annexe A4 - 3 : Compte rendu du sondage au piézocône C-01 – Isle-Verte (provenance LVM)
Annexe A4 - 4 : Sondage au piézocône C-02 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)198
Annexe A4 - 5 : Compte rendu du sondage au piézocône C-02 – Isle-Verte (provenance LVM)
Annexe A4 - 6 : Sondage au piézocône C-03 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)201
Annexe A4 - 7 : Compte rendu du sondage au piézocône C-03 – Isle-Verte (provenance LVM)202
Annexe A4 - 8 : Sondage au piézocône sismique CM-03 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne
2014)
Annexe A4 - 9 : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-03 – Isle-Verte (provenance LVM)



Annexe A4 - 1 : Sondage au piézocône CPTu1 – F1 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)



Fichiers: U:\Geotec80\Style\LogMTQ\_Piezocone.sty

Annexe A4 - 2 : Sondage au piézocône C-01 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)



#### COMPTE RENDU D'ESSAI AU PIÉZOCÔNE

Nº DE L'ESSAI : 2-0( SITUATION Isle Veste Site : Chargé de projet : MTQ P0001920-0-10-100 N° projet : Opérateur : Simon P. GEALL 032(032)12\_00 Parolis Client : Nom du fichier : MIQ Coordonnées Gps : Date : 2014-6-25

	CARACTÉRISTIQUES	DE L'APPAREIL ET DE L'ESSAI	
Sonde utilisée :	DDG 1275 DDG 1221 Autre :	Liquide de saturation : - Sonde - Pierre poreuse	Glycérine Sillcone Glycérine Sillcone
Type de réduction de friction :	Beigne B Croix	Réducteur de friction (D mm) :	48 68 43 Autre :
Diamètre des tiges (mm) :	G 35,7 G 43,7	Distance Réducteur / Pointe	0.74
Dispositif de fonçage :	bate #1	Vitesse de fonçage (cm/min.) :	60 (MTQ) 120

CONSTANTES D'ÉTALONNAGE ET CAPACITÉ DE LA SONDE						
Date d'étalonnage :	MA: 2014	Étalonné par :	VERTEK			
	qc		fs	U2		
Capacité des capteurs :	🛛 100 MPa 🖸 44	1.5 MPa 13	300 KPa	3447.5 KPa		

	STRATIGRAPHIE DE L'AVANT TROU	-
Parallèle au forage		

PROFIL DE VS			
Distance de la poutre au forage :			
Détails de l'installation :			
Qualité du contact au sol :			

		CONSTAN	TES D'ÉTAL	ONNAGE ET O	APACITÉ DE LA SO	NDE
	qc	fs	U2	Heure	T (°C)	Remarque
Avant zérottage (eau)	-96	4.6	3.0			
Initial (eau)	· 0	0	0	12445	10,9	
Finale (vide)	66	0.3	-10			
Final (eau)	28	-4.3	-0.5	ISHIE	9.0	

S (Serv kosti/2)/Géotechnique/Piezocone/Instruction-Formulairee/CR-Bassi-Piazocone2.doc Piezocone2.doc Piezocone2.doc

Page 1 de 2

2012-07-10

#### Annexe A4 - 3 : Compte rendu du sondage au piézocône C-01 - Isle-Verte (provenance LVM)

			Diss	ipation	.00	986	Profondeur début :	Profondeur fin :	2460
	Prof. micro Prof. tiges	Prof. tiges	Temps	% approx.	Essai V	Redéman	Comments	aires (type de refus)	
1	D	1.42					3.57 - 1.19 - 126		
2	067	2.00					-055	2	
3	165	3.00					-1.2		
4	2.64	403							
5	363	500							
6	461	609							
7	560	FOR			-				
8	1659	308			-				
9	7.58	9085			-				
10	858	1600							
11	959.	1109.							
12	1608	1158							
13	1107	1259				-			
14	1207	12.50							
15	1300	1458							
16	1408	1558							
17	1505	1658							
18	1611	1758							
19	1712	19:59							
20	18:13	1959							
21	19/14	2058	-		-				
22	2015	2158	-						
23	1113	1259	-	-		-			
24	2218	22.58			-				
25	2219	1459	1		- 1	-			
26	12:24	24 64	-			_	01-		
27			1		-	-	regos		
28						-			
29						-			
30								012	
31			-			-		1.64	
32					_				
33		1	-			-			
34									
35						_			
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45		allon M	0						
46									
47									
48									
49			-						
50									

Annexe A4 - 3 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône C-01 – Isle-Verte (provenance LVM)



Fichiers: U:\Geotec80\Style\LogMTQ\_Piezocone.sty

Annexe A4 - 4 : Sondage au piézocône C-02 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)



Détails de l'installation : Qualité du contact au sol :

\$15ervices/72/Gotechnique/Plezocons/Instruction-Formula res/CR-Eseai-Plezocone2.doc

## COMPTE RENDU D'ESSAI AU PIÉZOCÔNE

Nº DE L'ESSAI : C-02

	SITUATION					
Site :	isk Upate	Chargé de projet :	MTQ			
N° projet :	Pouro1980.0.10.100	Opérateur :	Simon P. Gesul			
Client :	mia	Nom du fichier :	032(032)01-CPT-02			
Date :	2014-6-26	Coordonnées Gps :				

	CARACTÉRISTIQUES	DE L'APPAREIL ET DE L'ESSAI	
Sonde utilisée :	DDG 1275 DDDG 1221 D Autre :	Liquide de saturation : - Sonde - Pierre poreuse	Glycérine Silicone Glycérine Silicone
Type de réduction de friction :	Beigne Croix	Réducteur de friction (D mm) :	48 68 43 Autre :
Diamètre des tiges (mm) :	□ 35,7 □ 43,7	Distance Réducteur / Pointe	0,74
Dispositif de fonçage :		Vitesse de fonçage (cm/min.) :	60 (MTQ) 120

	CONSTANTES D'ÉTAL	ONNAGE ET CAPACITÉ	DE LA SONDE	
Date d'étalonnage :	Mai 2014 Étalonné par : VERTEK			
	qc		fs	U2
Capacité des capteurs :	🖬 100 MPa 🔲 44	.5 MPa 130	00 KPa	3447.5 KPa

	STRATIGRAPHIE DE L'AVANT TROU				
- Arco Avando toor - 4.6 m de casing de B loesger la sonde est à 7.07 m pour suporter les tiges latéralements dans la curche molte					
Profondeur estimée de la nappe :					
	PROFIL DE Vs				
Distance de la poutre au forage :					

CONSTANTES D'ÉTALONNAGE ET CAPACITÉ DE LA SONDE						
	qc	fs	uz	Heure	T (°C)	Remarque
Avant zérottage (eau)	-76	3.5	13.1			
Initial (eau)	0	0	0	11415	9.0	
Finale (vide)	25	1.4	-64	1111		
Final (eau)	63	0,1	-25	15430	9.0	

Page 1 de 2

2012-07-10

Annexe A4 - 5 : Compte rendu du sondage au piézocône C-02 - Isle-Verte (provenance LVM)
Pr 1 2	of. micro	Prof. tiges	-	1 3 3 3	2	2				
1 2		Naper (	Temps % approx.		Essai V Redémarr		Commentaires (type de refus)			
2	0	010					196 - 120 - 0.5e			
	690	107					-0.55			
3	200	207								
4	294	307								
5	391	-107								
8 1	4990	507								
7 4	586	607								
8	684	707	100	3						
	182	807	-							
0	120	907	-			-				
2	1,70	1007	-			_				
2 (	074	1107	-	-	-	_	1			
4	175	1207	-		_	-				
5	1-13	130+	-	-		-				
6 /	170 W 201	1507		-						
7 1	CIA	107	-							
8 /	594	1620	-			-				
9	1	10,00			-		1581			
0										
1										
2										
3						1				
4										
5						_				
6					11-11					
7										
8			-							
9						_				
1			-		-	-				
2			-			-				
3			-			-				
4			-			-				
5			-			-				
6			-		-					
7			-							
8					-					
9										
0										
1										
2										
3					_					
4										
5										
5										
/										
8			-							
						_				
<u> </u>										
	0-1700-1700-17-0-0-				and the second					
ww.ceol/72%Gibolionin	igue/Plazocons/Imatrus	cion-Romataana/CR-Easai-Pie	incons2 doc		Pag	e 2 de	12 [3]	20%		
							here			

Annexe A4 - 5 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône C-02 – Isle-Verte (provenance LVM)



Fichiers: U:\Geotec80\Style\LogMTQ\_Piezocone.sty

Annexe A4 - 6 : Sondage au piézocône C-03 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)



### COMPTE RENDU D'ESSAI AU PIÉZOCÔNE



Nº DE L'ESSAI : C-03

SITUATION				
Site :	kle Veate	Chargé de projet :	hig	
N° projet :	Pow 1920-0-10-100	Opérateur :	Silver P. Epsinl	
Client :	Mia	Nom du fichier :	032(032)01-0-03	
Date :	2014-6.24 27	Coordonnées Gps :		

	CARACTÉRISTIQUES	DE L'APPAREIL ET DE L'ESSAI	41
Sonde utilisée :	DDG 1275 BrDDG 1221 D Autre :	Liquide de saturation : - Sonde - Pierre poreuse	Givcérine Gisicone Givcérine G-Silicone
Type de réduction de friction :		Réducteur de friction (D mm) :	48 68 43 Autre :
Diamètre des tiges (mm) :	35,7 243,7	Distance Réducteur / Pointe	0.74
Dispositif de fonçage :	bali # 1	Vitesse de fonçage (cm/min.) :	60 (MTQ) 120

	CONSTANTES D'ÉTALONNA	GE ET CAPACITÉ	DE LA SONDE	
Date d'étalonnage :	herad 2014	Étalonné par :	VERTEK	
12. (19.7.17) (J	qc		fs	U2
Capacité des capteurs :	🗆 100 MPa 🔲 44.5 MF	Pa 130	0 KPa	3447.5 KPa

	STRATIGRAPHIE DE L'AVANT TROU
Parallèle au forage	
Profondeur estimée de la nappe :	
	PROFIL DE Vs
Distance de la poutre au forage :	
Détails de l'installation :	
Qualité du contact au sol :	

CONSTANTES D'ÉTALONNAGE ET CAPACITÉ DE LA SONDE						
	qe	fs	U2	Heure	T (°C)	Remarque
Avant zérottage (eau)	-5	2.1	10.3			4.
Initial (eau)	0	0	0	7426	\$67	
Finale (vide)	3	4.6	-12.3			
Final (eau)	- 20	0.4	-6.9	12420	10.3	

5:15enelosej/72xGeotectrei queliPiezoconeli netruction=FromularitaetCR-Exauel-Piezoconei2.doc. Page 1 de 2

2012-07-10

Annexe A4 - 7 : Compte rendu du sondage au piézocône C-03 – Isle-Verte (provenance LVM)

		- 1970	Diss	sipation	50	age	Profondeur début :	Proföndeur fin :	43.0
	Prof. micro	Prof. micro Prof. tiges		% spprox.	Essai	res (type de refus)	ype de refus)		
1		45	1		-		386-115-156	21	3
2	0.18	2.12		1	-		See Ins Inse	-	1
3	1.170	3.12	1				Do hteres are la	horizet	26
4	1.28.6	15	4	-		$\sim$	persona note it	teliciet.	P
5	2.25	4.12		1				10 A	
6	781		1						
7	322	512	1	1					
8	417	605	1						
9	215	20v	1	-					
10	Giz	8.010	-	-					
11	7.12	900	1	1	-				_
12	911	low	-	-		-			
13	Gla	line	1	-	-	-			
14	10.00	12.00	-		-				
15	life	12.00	-	-					
16	ihio	1300	-	-	-	-			
17	12/14	1900	-		-				
18	14 119.	1000	-						
19	1100	1606	-	-	-	-			_
20	11.00	100	-	-	-	-			_
21	12.2	10,00	-	-	-	-			_
22	1907	1700	-	-		-			_
23	12:00	2000	-	-					
24	1100	2100	-	-	_	_			_
25	1005	aloc.	-	-	-				
28	2105	1506		-	-				
27	2004	2100	-	-	-				
28	2301	2500	-	-		_			
20	2404	14600	-	-	-	-			
30	2505	1100	-			-			
34	2605	20 00	-	-		-			
37	27.05	200	-	-		-			
32	00 -	2000			_	_			
24	6702	5100	-	-					
25	5001	3206		-		_			
35	3101	55060	-						
27	3201	2406	-	-		_			
20	5301	3500	-	-	-				
20	3401	3606	-		-				
40	54.65	3656	-			-			
44	4501	3156	-	-					
42	5604	20,36	-	-					
42	3704	01.56							
44	3005	40 50	-		_				
45	5104	4136	-	-	_	_			
40	4005	4256	-		_	_	1 5	1.	
40	46,6t	13,04	-	-	_	_	for peters Que 1	litize	
47			-	-	_	_	V	72	
40			-		-	-	4970	?	
49			-		-		or (	P.	
50				1 1					

Annexe A4 - 7 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône C-03 – Isle-Verte (provenance LVM)



Annexe A4 - 8 : Sondage au piézocône sismique CM-03 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2014)



## COMPTE RENDU D'ESSAI AU PIÉZOCÔNE

Nº DE L'ESSAI : 50-03

SITUATION					
Site :	Iste Verte	Chargé de projet :	Mia		
N° projet :	Por 1920-0-10-100	Opérateur :	SIMON P. GRAVEL		
Client :	lutice	Nom du fichier :	032(032)12-5003		
Date :	2014 07-02	Coordonnées Gps :			

	CARACTÉRISTIQUES	DE L'APPAREIL ET DE L'ESSAI		
Sonde utilisée :	DDG 1275 ID-DDG 1221 Autre	Liquide de saturation : - Sonde - Pierre poreuse	Glycérine Silicone Glycérine Silicone	
Type de réduction de friction :	Beigne Croix	Réducteur de friction (D mm) :	48 68 43 Autre :	
Diamètre des tiges (mm) :	□ 35,7 □ 43,7	Distance Réducteur / Pointe	14 e74	
Dispositif de fonçage :	65t 771	Vitesse de fonçage (cm/min.) :	60 (MTQ) 120	

	CONSTANTES D'ÉTAL	ONNAGE ET CAPACITÉ	DE LA SONDE	
Date d'étalonnage :	Uni 2014	Étalonné par :	VERTEK	
	qc		fs	U2
Capacité des capteurs :	🖬 100 MPa 📴 44	.5 MPa 13	00 KPa	3447.5 KPa

STRATIGRAPHIE DE L'AVANT TROU				
	/			
Parallèle au forage				
Profondeur estimée de la nappe :				

PROFIL DE Vs		
Distance de la poutre au forage :	[0]	
Détails de l'installation :	sue gozan	
Qualité du contact au sol :	this bow.	

	qc	fs	U2	Heure	T (°C)	Remarque
Avant zérottage (eau)	23	4.8	6.6			
Initial (eau)	0	0	0	11:00	11.0	
Finale (vide)	1/72	-3.1	-3.7			
Final (eau)	1049	1.0	- 3.4	14:00	12-0	Send cender, pierce

Annexe A4 - 9 : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-03 – Isle-Verte (provenance LVM)

			Dissi	pation		rage	Profondeur début :	Profondeur fin :	15,79
	Prof. micro	Prof. tiges	Temps	% approx.	Essal	Redéman	Commentair	es (type de refus)	
1	10.0	151			-		3.26 - 1.15 - 1.20	2	
2	10.00	2,11			×				
3	11,57	311			K				
4	1253	411			X				
5	13.50	54			×				
6	14,45	611			X				
7	15.41	711	-		x				
8	1638	211	27.5	3	×				
9	17:34	9,11			x				
10	18,31	1011			x				
11	19:20	111			X				
12	20,26	1211	-		x				
13	2123	13,11	_		x				
14	2221	(4,11			X				
15	23/19	15,11	-		×		C.		
16	23,87	15,79			X		ZETUS INC	×	
17	0	. 1.	2		-	_			
18			-						
19			-	_					
20			-		_				
21			-						
22					_				
23			-						
24			_						
25			-						
26									
27									
28									
29									
30			-	-					
31			-	-	_	-			
32					_	_			
33					-				
34						_			
35			-		-	_			
37			-			_			
38		_	-		-	-			
39				_		-			
40					-	-			
41			-		-	-			
42					_	-			
43					-	-			_
44				-	-				
45					-				
46				-	-	-			
47			-						
48					$\rightarrow$	-		_	
49				-	-	-			
50			-			-			

Annexe A4 - 9 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-03 – Isle-Verte (provenance LVM)



MTO

2014-07

Site :

N° projet :

Client :

Date :

#### COMPTE RENDU D'ESSAI AU PIÉZOCÔNE

Nom du fichier :

Coordonnées Gps :

N° DE L'ESSAI: 50.03 Soite SITUATION Isie Veete Chargé de projet: Mito Poes (980.0.10.100 Opérateur: Simo P.609-1

Inca allena

5003

032 (037

	CARACTÉRISTIQUES I	DE L'APPAREIL ET DE L'ESSAI	
Sonde utilisée :	DDG 1275 DDG 1221 Autre :	Liquide de saturation : - Sonde - Pierre poreuse	Glycérine Glycérine Silicone Glycérine Glycérine
Type de réduction de friction :	Beigne Croix	Réducteur de friction (D mm) :	48 68 43 Autre :
Diamètre des tiges (mm) :	G 35,7 B 43,7	Distance Réducteur / Pointe	
Dispositif de fonçage :	bati #1	Vitesse de fonçage (cm/min.) :	60 (MTQ) 120

CONSTANTES D'ÉTALONNAGE ET CAPACITÉ DE LA SONDE									
Date d'étalonnage :	mai 2014	Étalonné par :	VERTEK						
	qc		f,	U2					
Capacité des capteurs :	🖬 100 MPa 🗔 44	.5 MPa 130	00 KPa	3447.5 KPa					

STRATIGRAPHIE	DE L'AVANT TROU
Printer 551	0 - 16,8 m dur 16,8 - 26 5 m tais eaich 26,5 - eaich BQ t eifer 4307 m
Parallèle au forage	
Profondeur estimée de la nappe :	

PROFIL DE VS							
Distance de la poutre au forage :	0.36						
Détails de l'installation :	8						
Qualité du contact au sol :							

		CONSTAN	TES D'ÉTALO	ONNAGE ET C	APACITÉ DE LA SO	NDE
	qe	fs	u2	Heure	T (°C)	Remarque
Avant zérottage (eau)	-38 IL	-16	182	7623		
Initial (eau)	0	0	0	tito	11.6	
Finale (vide)	-22	-2.3	1.1			
Final (eau)	-23	-10	-1.2	101.31	12.6	

5 (Serviced/72/Géniechnique/Proposonellimitraction-Formulairesi/CR-Essue-Proposonell doc

Page 1 de 2

2012-07-10

Annexe A4 - 9 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-03 - Isle-Verte (provenance LVM)

			sq marked a second seco		age	Profondeur début :	Profondeur fin :	
	Prof. micro	Prof. tiges			Essai V Redémarr	Commenta	aires (type de refus)	
1	20	17.51					A.26 - 1.15 - 12	0
2	20.57	1811			X			
3	21.55	1911			×			
4	22.53	20,11			x			
5	23 52	2(11			K			
6	24 51	7711			x			
7	2550	23/1			x			
8	26.18	2411	-		N	-		
9	2745	2511	-		x			
10	25.47	2611	-		N	-		
11	29,46	2711			2			
12	3045	2511			×	-		
13	3142	2311		1	×			
14	2242	211	-		×			
15	3341	2/11			X			
16	22.51	51,0		1	-	-		
17					-	-		
18			-			-		
19			-		-	-		
20			-	-		-		
21			-			-		
22			1	-		-		
23			-	-		_		
24			-	-		-		
25			-		-			
26			-		-	-		
27				-	-	-		
28			-	-	-			
20			-			-		
30			-		-	-		
21			-	-	-	-		
12			-	-	-	-		
22			-		_	-		
24			-		-	-		
15			-		-	-		
R A			-		-	-		
17			-		-	-		
18			-		-	-		
10					-	-		
10			-		-	_		
1					-	-		
12			-		-	-		
13			-		-			
4			-		_	-		
-			-		_			
2			-			_		
0			-					
1			-					
6								
9								
0						- 1		

Annexe A4 - 9 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-03 – Isle-Verte (provenance LVM)

## Annexe A5 : Essais oedométriques

Annexe A5 - 1 : Essai oedométrique F2 – PS1 24,25m – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)	.210
Annexe A5 - 2 : Essai oedométrique F2 – PS3 28,20m – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)	211
Annexe A5 - 3 : Essai oedométrique F2 – PS3 32,10m – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne	040
2006)	.212
Annexe A5 - 4 : Essai oedometrique CR1-A – Isle-Verte (elevation 21,34m)	.213
Annexe A5 - 5 : Essai oedometrique CR1-A – Isle-Verte – representation lineaire	.213
Annexe A5 - 6 : Essai oedométrique CR2-A – Isle-Verte (élévation 19,66m)	.214
Annexe A5 - 7 : Essai oedométrique CR2-A – Isle-Verte – représentation linéaire	.214
Annexe A5 - 8 : Essai oedométrique S2-TM1 – Isle-Verte (élévation 19,26m)	.215
Annexe A5 - 9 : Essai oedométrique S2-TM1 – Isle-Verte – représentation linéaire	.215
Annexe A5 - 10 : Essai oedométrique CR4-A – Isle-Verte (élévation 16,36m)	.216
Annexe A5 - 11 : Essai oedométrique CR4-A – Isle-Verte – représentation linéaire	.216
Annexe A5 - 12 : Essai oedométrique S2-TM2 – Isle-Verte (élévation 16,12m)	.217
Annexe A5 - 13 : Essai oedométrique S2-TM2 – Isle-Verte – représentation linéaire	.217
Annexe A5 - 14 : Essai oedométrique S4-TM4 – Isle-Verte (élévation 6,03m)	.218
Annexe A5 - 15 : Essai oedométrique S4-TM4 – Isle-Verte – représentation linéaire	.218
Annexe A5 - 16 : Essai eodométrique S2-TM5 – Isle-Verte (élévation 3,08m)	.219
Annexe A5 - 17 : Essai oedométrique S2-TM5 – Isle-Verte – représentation linéaire	.219
Annexe A5 - 18 : Essai oedométrique S2-TM6 – Isle-Verte (élévation -1,09m)	.220
Annexe A5 - 19 : Essai oedométrique S2-TM6 – Isle-Verte – représentation linéaire	.220

Rapport no: AT-032-2006

Tube no: 554



Date: 2006-04-25

Annexe A5 - 1 : Essai oedométrique F2 – PS1 24,25m – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A5 - 2 : Essai oedométrique F2 – PS3 28,20m – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A5 - 3 : Essai oedométrique F2 – PS3 32,10m – Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A5 - 4 : Essai oedométrique CR1-A – Isle-Verte (élévation 21,34m)



Annexe A5 - 5 : Essai oedométrique CR1-A - Isle-Verte - représentation linéaire



Annexe A5 - 6 : Essai oedométrique CR2-A – Isle-Verte (élévation 19,66m)



Annexe A5 - 7 : Essai oedométrique CR2-A - Isle-Verte - représentation linéaire



Annexe A5 - 8 : Essai oedométrique S2-TM1 – Isle-Verte (élévation 19,26m)



Annexe A5 - 9 : Essai oedométrique S2-TM1 – Isle-Verte – représentation linéaire



Annexe A5 - 10 : Essai oedométrique CR4-A – Isle-Verte (élévation 16,36m)



Annexe A5 - 11 : Essai oedométrique CR4-A – Isle-Verte – représentation linéaire



Annexe A5 - 12 : Essai oedométrique S2-TM2 – Isle-Verte (élévation 16,12m)



Annexe A5 - 13 : Essai oedométrique S2-TM2 – Isle-Verte – représentation linéaire



Annexe A5 - 14 : Essai oedométrique S4-TM4 – Isle-Verte (élévation 6,03m)



Annexe A5 - 15 : Essai oedométrique S4-TM4 – Isle-Verte – représentation linéaire



Annexe A5 - 16 : Essai eodométrique S2-TM5 – Isle-Verte (élévation 3,08m)



Annexe A5 - 17 : Essai oedométrique S2-TM5 – Isle-Verte – représentation linéaire



Annexe A5 - 18 : Essai oedométrique S2-TM6 – Isle-Verte (élévation -1,09m)



Annexe A5 - 19 : Essai oedométrique S2-TM6 – Isle-Verte – représentation linéaire 220

## Annexe A6 : Essais triaxiaux

Annexe A6 - 1 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant	
l'essai CIU – CR2-C – Isle-Verte	222
Annexe A6 - 2 : Cheminement de contraintes (Lambe) - CR2-C - Isle-Verte	222
Annexe A6 - 3 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant	
l'essai triaxial CIU – S2-TM1 – Isle-Verte	223
Annexe A6 - 4 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S2-TM1 - Isle-Verte	223
Annexe A6 - 5 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant	
l'essai triaxial CIU – S1-TM2 – Isle-Verte	224
Annexe A6 - 6 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S1-TM2 - Isle-Verte	224
Annexe A6 - 7 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant	
l'essai triaxial CIU – CR4-C – Isle-Verte	225
Annexe A6 - 8 : Cheminement de contraintes (Lambe) - CR4-C - Isle-Verte	225
Annexe A6 - 9 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant	
l'essai triaxial CIU – S3-TM4 – Isle-Verte	226
Annexe A6 - 10 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S3-TM4 - Isle-Verte	226
Annexe A6 - 11 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant	
l'essai triaxial CIU – S3-TM6 – Isle-Verte	227
Annexe A6 - 12 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S3-TM6 - Isle-Verte	227

Les corrections apportées aux données des essais triaxiaux CIU sont pour la surface et pour la membrane.



Annexe A6 - 1 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai CIU – CR2-C – Isle-Verte



Annexe A6 - 2 : Cheminement de contraintes (Lambe) – CR2-C – Isle-Verte



Annexe A6 - 3 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S2-TM1 – Isle-Verte



Annexe A6 - 4 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S2-TM1 - Isle-Verte



Annexe A6 - 5 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S1-TM2 – Isle-Verte



Annexe A6 - 6 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S1-TM2 - Isle-Verte



Annexe A6 - 7 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – CR4-C – Isle-Verte



Annexe A6 - 8 : Cheminement de contraintes (Lambe) - CR4-C - Isle-Verte



Annexe A6 - 9 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S3-TM4 – Isle-Verte



Annexe A6 - 10 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S3-TM4 - Isle-Verte



Annexe A6 - 11 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S3-TM6 – Isle-Verte



Annexe A6 - 12 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S3-TM6 - Isle-Verte

# Annexe A7 : Caractérisation physico-chimique

Annexe A7 - 1 : Tableau des résultats de salinité	.229
Annexe A7 - 2 : Abaque de salinité et résultats de l'essai de salinité - Isle-Verte	.229
Annexe A7 - 3 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F1 de	
l'Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)	.230
Annexe A7 - 4 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F2 de	
l'Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)	231
Annexe A7 - 5 : Résultats des quatre essais de sédimentométrie effectués sur des échantillons de la	
campagne 2015 du site de l'Isle-Verte	232
Annexe A7 - 6 : Tableau des teneurs en eau et des limites d'Atterberg déterminées durant les différents	
essais de laboratoire - Isle-Verte	.233
Annexe A7 - 7 : Résultats des essais de perméabilité pour le site de l'Isle-Verte	234
Annexe A7 - 8 : Essai de perméabilité à charge variable – S2-TM1	.234
Annexe A7 - 9 : Essai de perméabilité à charge constante – S4-TM4	235
Annexe A7 - 10 : Essai de perméabilité à charge constante – S2-TM6	.235

Site de l'Isle-Verte										
Échantillons	Élévation moyenne (m)	Unité	Conductivité électrique (mS)	Concentration (g/l)						
CR2-A	19.59	Supérieure	18.7	15.7						
S4-TM4	5.97	Intermédiaire	29.6	25.4						
S2-TM6	-1.18	Inférieure	33.1	28.6						

Annexe A7 - 1 : Tableau des résultats de salinité



Annexe A7 - 2 : Abaque de salinité et résultats de l'essai de salinité - Isle-Verte



Annexe A7 - 3 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F1 de l'Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A7 - 4 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F2 de l'Isle-Verte (provenance MTMDET – campagne 2006)



Annexe A7 - 5 : Résultats des quatre essais de sédimentométrie effectués sur des échantillons de la campagne 2015 du site de l'Isle-Verte

Échantillana	Élévation	Profondeur	Tyme dláchantillen		w	Limites d'Atterberg			
Echantinons	(m)	(m)	Type d echantilion	i ype u essai	(%)	W <sub>P</sub>	wL	IP	۱L
CR1-A	21.26	5.18	carotte	oedo <sub>moy</sub>	20.6	20.2	39.5	19.3	0.0
CR2-A	19.59	6.85	carotte	oedo <sub>moy</sub>	21.6	19.8	40.0	20.3	0.1
TM1	19.27	7.07	tube	tube <sub>moy</sub>	21.2				
S2-TM1	19.24	7.10	tube	oedo <sub>moy</sub>	19.8	19.3	44.0	24.7	0.0
CR2-C	19.32	7.12	carotte	triax <sub>moy</sub>	21.2				
S2-TM1	19.16	7.18	tube	triax <sub>moy</sub>	19.9				
S4-TM2	16.24	10.10	tube	tube <sub>moy</sub>	21.4	21.1	47.7	26.7	0.0
CR4-A	16.29	10.15	carotte	oedo <sub>moy</sub>	23.2	20.0	43.4	23.5	0.1
S1-TM2	16.17	10.17	tube	triax <sub>moy</sub>	21.3				
TM2	16.11	10.23	tube	tube <sub>moy</sub>	21.4				
S2-TM2	16.07	10.27	tube	oedo <sub>moy</sub>	21.5	21.0	46.6	25.6	0.0
CR4-C	16.01	10.43	carotte	triax <sub>moy</sub>	22.5				
TM4	6.13	20.21	tube	tube <sub>moy</sub>	27.1				
S3-TM4	6.08	20.26	tube	triax <sub>moy</sub>	27.2				
S4-TM4	5.98	20.36	tube	oedo <sub>moy</sub>	27.1	20.2	45.2	24.9	0.3
S2-TM5	3.03	23.31	tube	oedo <sub>moy</sub>	27.9	19.4	44.9	25.5	0.3
TM5	3.01	23.33	tube	tube <sub>moy</sub>	27.9				
S3-TM5	2.90	23.44	tube	tube <sub>moy</sub>	27.9	21.2	45.3	24.1	0.3
S2-TM6	-1.23	27.57	tube	oedo <sub>moy</sub>	32.6	19.6	43.8	24.2	0.5
TM6	-1.29	27.63	tube	tube <sub>moy</sub>	30.8				
S3-TM6	-6.03	32.37	tube	triax <sub>moy</sub>	29.8				

Annexe A7 - 6 : Tableau des teneurs en eau et des limites d'Atterberg déterminées durant les différents essais de laboratoire – Isle-Verte

Site	Échantillon	Élévation (m)	Unité	Perméabilité (k <sub>o</sub> ) (m/s)	e <sub>o</sub>	C <sub>k</sub>	Relation c <sub>k</sub> - e <sub>0</sub>	Type d'essai
	S2-TM1	19.26 à 19.21	supérieure	5.08E-11	0.54	0.67	c <sub>k</sub> =1.3*e <sub>0</sub>	charge variable
Isle-Verte	S4-TM4	6.03 à 5.92	intermédiaire	3.21E-10	0.78	0.53	$c_k = 0.7 * e_0$	charge constante
	S2-TM6	-1.17 à -1.275	inférieure	3.17E-10	0.94	0.66	$c_k = 0.7 * e_0$	charge constante

Annexe A7 - 7 : Résultats des essais de perméabilité pour le site de l'Isle-Verte



Annexe A7 - 8 : Essai de perméabilité à charge variable – S2-TM1



Annexe A7 - 9 : Essai de perméabilité à charge constante - S4-TM4



Annexe A7 - 10 : Essai de perméabilité à charge constante – S2-TM6
### Annexe A8 : Caractérisation minéralogique et datations

Annexe A8 - 1 : Résultat de la datation au C <sup>14</sup> – TM5 (Isle-Verte - 23.17 à 23.46m d'élévation – unité intermédiaire)	7
Annexe A8 - 2 : Résultat de la datation au C <sup>14</sup> – S3-TM2 (Isle-Verte – 16,02 à 15,92m d'élévation – unité	,
supérieure)23	8
Annexe A8 - 3 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – CR4-A – Isle-Verte (unité supérieure)	9
Annexe A8 - 4 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – CR4-A – Isle-Verte (unité supérieure)	0
Annexe A8 - 5 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – S2-TM5 – Isle-Verte (unité intermédiaire)	1
Annexe A8 - 6 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – S2-TM5 – Isle-Verte (unité intermédiaire)	2
Annexe A8 - 7 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – S2-TM6 – Isle-Verte (unité inférieure)	3
Annexe A8 - 8 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – S2-TM6 – Isle-Verte (unité	1
Annexe $\Delta 8 = 0$ : Tableau des résultats de l'essai de surface spécifique totale $24$	+ 5
Annexe A8 - 10 : Détermination de la quantité de bleu de méthylène par spectrophotomètre UV pour	J
l'obtention de la surface spécifique – Isle-Verte24	5
Annexe A8 - 11 : Tableau des résultats pour la capacité d'échange cationique (CEC) – Isle-Verte	6
Annexe A8 - 12 : Tableau des résultats pour l'essai thermogravimétrique (sans traitement à l'acide	
chlorhydrique)	6
Annexe A8 - 13 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique – CR4-A – Isle-Verte24	6
Annexe A8 - 14 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique – S2-TM5 – Isle-Verte24	7
Annexe A8 - 15 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique - S2-TM6 - Isle-Verte24	8
Annexe A8 - 16 : Tableau des calculs pour l'obtention du % en calcite, dolomite et carbonate total par la	
méthode Chittick	9



# Résultats <sup>14</sup>C

#### Kevin Hébert

17 juillet 2015

University of Georgia #	Université Laval #	# Client (type échantillon)	Pré- traitement	рМС	±	<sup>14</sup> C âge (BP)	±
UGAMS-21400	ULA-5383	G416 (coquille)	leaching	18.68	0.07	13480	30

Pour ces analyses AMS, le dioxyde de carbone produit par les échantillons a été purifié de façon cryogénique des autres produits de réaction et converti de façon catalytique en graphite en utilisant la méthode de Vogel et al. (1984) Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B5, 289-293.

Des échantillons mesurant le bruit de fond de l'appareil (préparés avec de la calcite ne contenant pas de <sup>14</sup> C), ont été soustraits.

Ces résultats sont non-calibrés et donnés en âge radiocarbone avant 1950 (âge BP ou 'Before Present'), en utilisant la demi-vie du <sup>14</sup> C de 5568 ans. Les erreurs (±) sont données à une déviation standard et reflètent les erreurs statistiques et expérimentales. Les dates ont été corrigées pour le fractionnement isotopique.

*pMC = % de carbone moderne.* 

Annexe A8 - 1 : Résultat de la datation au C<sup>14</sup> – TM5 (Isle-Verte - 23.17 à 23.46m d'élévation – unité intermédiaire)



# Résultats <sup>14</sup>C

### **Kevin Hébert**

23 mars 2016

University of Georgia #	Université Laval #	# Client (type échantillon)	Pré- traitement	рМС	±	D <sup>14</sup> C (‰)	±	<sup>14</sup> C âge (BP)	±
UGAMS-24318	ULA-5846	I-V S3-TM2 G442 (coquille)	leaching	14.90	0.07	-851.0	0.7	15295	35

Pour ces analyses AMS, le dioxyde de carbone produit par les échantillons a été purifié de façon cryogénique des autres produits de réaction et converti de façon catalytique en graphite en utilisant la méthode de Vogel et al. (1984) Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B5, 289-293.

Des échantillons mesurant le bruit de fond de l'appareil (préparés avec de la calcite ne contenant pas de <sup>14</sup> C), ont été soustraits.

Ces résultats sont non-calibrés et donnés en âge radiocarbone avant 1950 (âge BP ou 'Before Present'), en utilisant la demi-vie du <sup>14</sup> C de 5568 ans. Les erreurs (±) sont données à une déviation standard et reflètent les erreurs statistiques et expérimentales. Les dates ont été corrigées pour le fractionnement isotopique.

pMC = % de carbone moderne.

Annexe A8 - 2 : Résultat de la datation au C<sup>14</sup> – S3-TM2 (Isle-Verte – 16,02 à 15,92m d'élévation – unité supérieure)



Universite Laval, Quebec. - Thu May 28 2015 @2:37pm

Annexe A8 - 3 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – CR4-A – Isle-Verte (unité supérieure)



Universite Laval, Quebec. - Mon Jun 01 2015 @2:43pm

Annexe A8 - 4 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – CR4-A – Isle-Verte (unité supérieure)



Universite Laval, Quebec. - Thu May 28 2015 @12:03pm

Annexe A8 - 5 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – S2-TM5 – Isle-Verte (unité intermédiaire)



Universite Laval, Quebec. - Mon Jun 01 2015 @3:08pm

Annexe A8 - 6 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – S2-TM5 – Isle-Verte (unité intermédiaire)



Universite Laval,Quebec. - Mon Jul 20 2015 @3:02pm

Annexe A8 - 7 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – S2-TM6 – Isle-Verte (unité inférieure)



Universite Laval, Quebec. - Mon Jul 20 2015 @3:30pm

Annexe A8 - 8 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – S2-TM6 – Isle-Verte (unité inférieure)

Fiole	Échantillon	Site d'étude	Élévation	Surface spécifique
			m	m²/g
PE022	CR4-A	Isle-Verte	16.29	48
G281	S2-TM5	Isle-Verte	3.03	31
M531	S2-TM6	Isle-Verte	-1.23	38

Annexe A8 - 9 : Tableau des résultats de l'essai de surface spécifique totale



Annexe A8 - 10 : Détermination de la quantité de bleu de méthylène par spectrophotomètre UV pour l'obtention de la surface spécifique – Isle-Verte

Site d'átude	Échantillon	CEC
	Lenantinon	meq/100g
Isle-Verte	CR4-A	8.8 ± 0.6
Isle-Verte	S2-TM5	7.8 ± 0.6
Isle-Verte	S2-TM6	6.9 ± 0.5

Annexe A8 - 11 : Tableau des résultats pour la capacité d'échange cationique (CEC) - Isle-Verte

Annexe A8 - 12 : Tableau des résultats pour l'essai thermogravimétrique (sans traitement à l'acide chlorhydrique)



Annexe A8 - 13 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique – CR4-A – Isle-Verte



Annexe A8 - 14 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique - S2-TM5 - Isle-Verte



Annexe A8 - 15 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique - S2-TM6 - Isle-Verte

Data	Échantillan	Masse échantillon	Température	Pression atmos	Volume	fac	fac	volume	%calcite 1.7g	%ooloito
Date	Lenantinon	(g)	(°C)	(mmHg)	après 30sec (cm <sup>3</sup> )	température	vol gaz	gaz (cm³)	pour 1.7g	%carcile
	CR4-A	1.652	23	751.6	28	0.5	1.0314	7.92	1.80	1.9
08-sept-15	S2-TM5	1.703	23	751.6	27	0.5	1.0314	6.93	1.50	1.5
	S2-TM6	1.880	23	751.6	31	0.5	1.0314	10.89	2.50	2.3

Annexe A8 - 16 : Tableau des calculs pour l'obtention du % en calcite, dolomite et carbonate total par la méthode Chittick

Annexe A8 - 16 (suite) : Tableau des calculs pour l'obtention du % en calcite, dolomite et carbonate total par la méthode Chittick

Data	Échantillon	Température	Pression atmos	Volume	fac	volume	%dolomite	%dolomito	%Ca total
Date	Echantinon	(°C)	(mmHg)	après 30min (cm³)	vol gaz	gaz (cm <sup>3</sup> )	pour 1.7g	/additinite	
	CR4-A	23	751.6	41	1.0314	13.41	3.40	3.5	5.4 ± 0.3
08-sept-15	S2-TM5	23	751.6	40	1.0314	13.41	3.40	3.4	4.9 ± 0.3
	S2-TM6	23	751.6	48	1.0314	17.53	4.40	4.0	6.2 ± 0.3

### Annexe A9 : Profils géotechniques par sondages

Annexe A9 - 1 : Profil géotechnique – F1 et CPTu1 – Isle-Verte (provenance MTMDET – campa	igne 2006)
	251
Annexe A9 - 2 : Profil géotechnique - F2 - Isle-Verte (provenance MTMDET - campagne 2006)	)252



Annexe A9 - 1 : Profil géotechnique - F1 et CPTu1 - Isle-Verte (provenance MTMDET - campagne 2006)



Annexe A9 - 2 : Profil géotechnique - F2 - Isle-Verte (provenance MTMDET - campagne 2006)

# Annexe B

# Notre-Dame-des-Neiges

## Annexe B : Notre-Dame-des-Neiges

### Annexe B1 : Rapports de sondage et tomodensitométrie (CT-SCAN)

Annexe B1 - 1 : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2008)	255
Annexe B1 - 2 : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2008)	258
Annexe B1 - 3 : Rapport de sondage C1-1 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)	260
Annexe B1 - 4 : Rapport de sondage C1-2 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)	263
Annexe B1 - 5 : Rapport de sondage F-05-SW (provenance MTMDET – campagne 2014)	266
Annexe B1 - 6 : CT-SCAN TM-01 - axe coronal	268
Annexe B1 - 7 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-01	268
Annexe B1 - 8 : CT-SCAN TM-02 - axe coronal	269
Annexe B1 - 9 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-02	269
Annexe B1 - 10 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal	270
Annexe B1 - 11 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-03	270
Annexe B1 - 12 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal	271
Annexe B1 - 13 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-04	271
Annexe B1 - 14 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal	272
Annexe B1 - 15 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-05	272
Annexe B1 - 16 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal	273
Annexe B1 - 17 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-06	273
Annexe B1 - 18 : Rapport de sondage F-05-PW (provenance MTMDET – campagne 2014)	274
Annexe B1 - 19 : Rapport de sondage FZ-05 (provenance MTMDET – campagne 2014)	276

Transport	Transports Québec :::: RAPPORT DE SONDAGE															
Localisation	oénéral	e:	Notre-Dame des Neige	es				Do	ssier: 00	20-08-10	0(017)074	SONDAGE (	[vpe d'arrêt):	E1 (	V)	000
Endroit: C	ulée oue	est							Date: 20	08-04-14	1	001121122 (	Élévation:	84.82m	(Géod	ésique)
TYPES D'ÉCHA	NTILLONNE	UR	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	TYPE	PES D'ARRÊT ESSAIS E: Module pressiométrique Dv. Dvid									oids volu	mique	
CF: Cuiller	e fendue		Intact	F: A	méti	orcé		N: F	énétration :	standard	St: Sens	sibilité	•	W: T	eneuren	eau (%)
CR: Carott	stationn	aire	Remanié	I: A	mêti	ndéte	rminé	X Suc: S	cissomètre	(kPa)	AG: Anal	yse Granulomé	trique –	WE L	imite de l	iquiditė (%)
TA: Tarière	9		Perdu	V: A	mêtv	volont	aire	X Sr. S	cissomètre	(kPa)	C: Cons	solidation	⊢	Wp: L	imite de p	plasticité (%)
VR: Vrac			Carotte	R: Hetus N:					erméabilité Ression limi	(m/s) Ha (k-Da)	Suv: Cisa	illement sité colativo		: N	iveau d'e	au (m)
Élov	Piéz o-		COUPE GÉOLOGI	QUE		Т		- Fi. F	ression ini	É(	CHANTILLO	ONS ET ESS	AIS			
Prof.	métrie		Description			+	Pro	f Type	Réc	N	N1 / N2 / N3		Cu 40	80	120	160
(m)	08-12		stratigraphique		Str	État	(m	) -No	(cm/cm)	RQD	Rem. sur N / ROD	Essais	W 20	40	60	80
84.82	2008	Те	rre végétale	_	~ ~	1	-	_						ΠĨ	TT	
84.37	1111	Sa	ble avec un peu de silt	et .	ñ											
-	+	de	gravier			١X	0.7	0 CF11	0/60	6	3/3/3	]				
È.						E	1.5	3				1				
2 82.62				CF12 3	3/60	4	1/2/2									
2.20		Sa	ible avec un peu de silt. Jeux et traces d'arcile à	a	1	$\mathbf{X}$	2.2	6 CF13	0/60	10	4/5/5	1				
E		ar	gileux		1	E	3.0	7				AG				
È.				1		ıΖ	3.0	' CF14	36/60	12	2/5/7	AG				
4					X	$\mathbf{X}$	3.8	0 CF15	48/60	5	2/2/3	1				
F						Æ	4.5	9				AC				
E				1	1	X		CF16	46/60	9	2/3/6	719				
F				X		5.3	5 CF17	50/60	8	2/3/5	1					
- <del>6</del> 6.00		Silt argileux avec des de sable		xes (	fμ	r E		5				1				
F					11	łΖ	0.1	<sup>5</sup> CF18	41/60	15	3/6/9					
E					机		6.8	7 CF19	42/60	20	4/8/12	1				
Ē				ļ	XI.	IF.	78	7				AC				
8	'						Ж	μ×	1.0	' CF20	43/60	15	3/6/9	AG	┟┼┼┼╄╸	
E						Ж	U									
È .				- 1	W		9.0	0 CF21	43/60	15	4/6/9	1				
E				- 1	Uł	1P	-					-				
-10					1#	1										
E					fŀ	ľ⊳	10.5	53 CE22	41/60	25	4/9/16	1				
E					11	ł۴	+					-				
E						ł										
-12					11	卜	12.0	06 CF23	43/60	22	5/10/12	1				
ŧ					Æ	¥	-					-				
Ē				1	X	H										
103.5					H	lЬ	13.5	58 CF24	44/60	27	5/11/16	1				
8				1	H	14	-					-				
08-10					H	f.										
2	🛓				W	11	15.1	10 CF25	47/60	29	6/12/17	AG				
₫ 10						1P	+	+								
10.00					11	łI –										
Mar all						łÞ	16.6	64 CF26	55/60	26	6/11/15	1				
8					1	IР	-					1				
					łł	И										
Mato					X	卜	18.1	15 CF27	60/60	29	6/12/17	1				
2413				- 1	H	ИĤ	-					1				
and					H	1										
050					W	1 >	19.5	56 CF28	56/60	27	8/11/16					

Annexe B1 - 1 : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B1 - 1 (suite) : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2008)

Transpor Qu	Transports         RAPPORT DE SONDAGE         Page 3 de 3														
Localisatio	n général	e : Notre-Dame des Nei	ges			Do	ssier: 00	20-08-10	00(017)07 <b>A</b>	SONDAGE (T	Type d'ai	rrêt): F1	(V)		
Endroit: (	Culée oue	st					Date: 20	08-04-14	4		Élévat	ion: 84.82	m (Géo	désique)	
TYPES D'ÉCH	ANTILLONNE	UR ÉTAT DES ÉCHANTILLON	S TYPES DV	ARÊT		ESSAIS	}		E: Modu	le pressiométr	ique	Pv:	Poids vo	lumique	
CF: Cuille	re fendue	Intact	F: Amêti	orcé		N: P	énétration :	standard	d St: Sensi	bilité		• W:	Teneure	n eau (%)	
CR: Carot	n stationn ttier	Remanié	I: Arrêti	ndéter	miné	X Suc: S	cissomètre	(kPa)	AG: Analy	se Granulomé	trique	H WE	Limite de	) liquidité (%)	
TA: Tariè	re	Perdu	V: Arrêty	olonta	aire	X Sr. S	cissomètre	(kPa)	C: Cons	olidation		H Wp:	Limite de	) plasticitė (%)	
VR: Vrac		Carotte	R: Refus			K: P	ermeabilite	(m/s) ite (kDe)	Suv: Cisail	lement té relative		₹ 3	Niveau o	leau (m)	
Élev	Piéz o-	COUPE GÉOLO	GIQUE	Т				É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS				
Prof.	métrie	Description		+	Pro	f Type	Béc	N	N1 / N2 / N3		Cu	40 80	120	160	
(m)	08-12	stratigraphique	Str	État	(m)	) -No	(cm/cm)	RQD	Rem. sur N / ROD	Essais	w	20 40	60	80	
	2008			- -	39.8	1	108/						,	Ť	
42.05				$\langle \rangle$	00.0	CR12	1067	100							
43.95		Fin du forage			$\vdash$										
E															
-42															
Ē															
E															
Ę														·	
-44															
ŧ															
E															
È.															
-46															
Ę															
E															
Ē															
-48															
Ē															
È.															
E															
-50															
E															
È															
È															
-52															
ŧ															
E															
-															
-64															
8-															
5 F															
58															
2040															

Annexe B1 - 1 (suite) : Rapport de sondage F1 (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B1 - 2 : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2008)

Transpor	Transports Québec IIII     RAPPORT DE SONDAGE     Page 2 de 2																
Localisatio	n général	e: I	Notre-Dame des Neige	95				Do	ssier: 00	20-08-10	00(017)07 <b>A</b>	SONDAGE (T	ype d'a	rrêt): F	2 (V)		
Endroit:	Pilier #1								Date: 20	08-03-27	,		Élévat	ion: 60.8	31m (G	éodésiq	ue)
TYPES DÉCH	ANTILLONN	UR	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	TYPE	ES D'AR	rêt		ESSAIS E: Module pressiométrique Pv: Poids volumin								volumiqu	Je
CF: Cuillé DS: Disto	ere fendua n stationn	nim	Intact	F: A	mêt for	DÓ		N: P	énétration :	standard	St: Sens	bilité		• W:	Teneu	ren eau	(%)
CR: Caro	ttier		Remanié	I: A	mêtind	élen	ninė	X Suc: S	cissomètre	(kPa)	AG: Analy	se Granulomé	trique	H WI:	Limite	de liquid	fité (%)
TA: Tarië	re		Perdu	V: A	innêt vol	onta	ire	X Sr. S	cissométre armósbilitó	(kPa) (m/c)	C: Cons	olidation		H Wp	<ul> <li>Limite</li> <li>Missee</li> </ul>	de plasti	icité (%)
AU: Autre	,		Carolle	letus			PI: P	ression limi	(m/s) ite (kPa)	Dr: Dens	iement ité relative		¥ :	Niveau	i deau (i	m)	
Élev.	Piézo-		COUPE GÉOLOGI	QUE													
Prof.	métrie		Description	_	Pro	f. Type	Réc.	N	N1/N2/N3	Freedo	Cu	40	80 1	20 1/	60		
(m)	08-12 2008		stratigraphique		Str.	État	(m)	) -No	(cm/cm)	RQD	N / RQD	Essais	w	20	40 6	30 ε	30 
40.19		Sil	t et argile avec des trao sable et de gravier	88	III	$\simeq$	19.9	0 CF7	30/45	39	13/17/22	AG		P=4			
20.62	2	Ro	oc sain	-	1		20.6	2									
Ę								CR1	100/	43							
					X		21.8	4									
E*									156/								
Ē					X			CR2	156	76							
37.41		-	du foraça														
23.40	'		i du lorage														
1																	
E																	
ŧ																	
-26																	
-																	
Ē																	
ŧ.																	
E-28																	
-																	
E																	
F																	
E-30																	
F																	
E																	
Ē																	
F-32																	
Ē																	
ŧ																	
9	1																
-34															╋╋	╋	
	1																
1000	1																
36	1																
	1																
8																	
-38	1																
Topologi																	
10000	1																
S-	1																

Annexe B1 - 2 (suite) : Rapport de sondage F2 (provenance MTMDET – campagne 2008)

ſ	Transpo QL	uébec	* *	I	RA]	PF	o	RT	DE	s	ONI	)A(	GE							Page	e 1 de	• 3	
L	ocalisatio	on générai	e: N	lotre-Dame-des-Neiges					0	055	ier: 002	0-08-10	00(17)07A12		S	ONDA	GE	: C1-	1				
E	ndroit:	127+068	GG				Da	te de d	lébut du s	ond	age: 201	2-09-13	3	Р	rof. fin (t	ype a	nêt	): 60.0	)5 m (	v)			
T C F C T	YPES DECK (F: Cuillèr (S: Piston (R:Carott (A: Tarièr	HANTILLONN re fendue n stationna tier re	EUR ire	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	ESS N: Suv:	AIS Pér Scis Scis	nétrat ssom	ion sta ètre (k ètre (k	E ndard S Pa) / Pa) (	E I St: S AGU C: (	Module pre Sensibilité Analyse Gi Consolidat	essiomi ranulon ion	étrique F ● V métrique O V → V	Pv: Poi W: Ter W: Poi W: Lim	ds volur neur en ( ur calcul nite de lie	nique eau (% er l. (* quidité	%) %) ≦ (१	6)	Cc	ordo IM N/ 532	nnée \D83 28658 0083(	s (m) (Zon 9.71 r	): me:7) m (Y) m (X)
V	/R:Vrac	IN: Indéte DE: Déla	rminé vé	Carotte	K: Pŀ	Per	méat ssion	pilité (n limite	n√s) 1 (kPa) [	; ( Dr: I	Cisailleme Densité rel	nt ative	<u>ب</u>	Np:Lim	nite de pl reau d'ea	lastici au (m)	té (	%)	Élé	vation	r: 82	2.78 r	m (Z)
F	Élev	Piézo	-		UE		T		(11.0)		benblie rei	É		ONS E	TESS	AIS	<u> </u>		(0	eoues	(que)		
	Prof.	métrie		Description				Prof	Type-No	f	Réc.	N	N1/N2/N3/N4	Es	sais	Su	4	0	80	12	0	160	
	(m) 82.7			stratigraphique	1	Str.	État	(m)	Calibre	-sno	(cm/cm) (%)	RQD	Rem.sur N/RQD	etr	notes	w	2	0	40	60	)	80	
F	0.0	ő	Sat	ole avec traces de silt et						S				$\vdash$									
Ē			très	lâche. Présence de		•		0.84	CE-1		30/45	0	1/0/0	-									
Ē	81.1	4	ma	tiere organique.							(67%)	-									#		
F	2 1.04	4	da	se silteux avec un peu gile, de compacité lâche	1	4	$\geq$	1.04	CF-2		(76%)	7	1/3/4	-							#		
Ē			ào	ompacte.			$\ge$	2.35	CF-3		37/45 (82%)/	18	2/5/13	AG							#		
Ē					1		$\times$	3.09	CF-4		26/45	18	6/8/10	1									
Ē	4				1111		$\sim$	3.89	CF-5		37/45	20	6/9/11	+									
E								4.61	05.8		(82%)	20	4/9/10	AG									
E							$\geq$	4.01	00		(93%)	20	4/0/12	~0									
Ē	6 76.6	4				4	$\geq$	5.41	CF-7		35/45	20	5/8/12	-									
Ē	6.1	4	Arg	ile silteuse avec un peu		X	$\times$	6.14	CF-8		28/45	18	4/6/12	AG									
ŧ			trac	es de gravier, très raide	j,	X	$\sim$	6.94	CF-9		33/45	27	3/13/14	-									
ŧ			à d coo	ure. Présence de uillages.	ľ	Ľ	E	7.64	CE-10		(73%) / 37/45	22	5/8/14	AG									
Ē	8				ŀ	Ł			CI-IU		(82%)	~~	3014										
F	73.8	9	Silt	et amile avec traces de	-1	A	$\otimes$	8.44	CF-11		0/45	23	4/9/14	AG									
ŧ		- -	sab	le à argile et silt, très	ł	Į)	P	0.00	UF-12		44/45 (98%)	- 22	0/8/13	~~									
F	10		raio	le a dure.	R	k															#		
Ē					1	X	ł														#		
Ē					ł	ĮĮ.															#		
Ē	12					X	$\bowtie$	11.49	CF-13		(78%)	24	6/10/14	-							##		
Ē					1	W																	
Ę					X	X		12.95	CF-14		39/45	27	5/11/16	1							#		
Ē					ý	W				1	_(8/%)_/			1									
"E	14					H		14.47	05.45		27/45	~	5144140										
20						X	$\vdash$	14.47	CF-15		(82%)	24	5/11/13	AG									
ξ.						U	ļ																
100	16					A	$\ge$	16.00	CF-16		33/45	20	5/9/11										
1000					8	11					(13%)												
dimo					1	Ð		17.52			27/45			4									
ŧ	18						P	17.02	CF-17		(82%)	22	5/8/14	+									
V00.85					ł	H	ł														#		
ğ					ł		$\ge$	19.05	CF-18		20/45	22	5/9/13								#		
<u>e</u>					1	H.					_[++76]_/			1_,									
GeotroBOAStyleLog1	Remarqu	es:													Équiper Type de Type de Rappor	ment ( e foraç e mart t d'én	de f ge: beau ergi	orage Multi-f I: 63.5 ie: nor	CME orage kg mesu	-55 .ré			
ŝ	l echnicie	en: Jacque	s Ham	el, tech.		Vé	rifié	par: So	ophie Pell	etie	r, ing. M.S	c.A.			Date de	es der	niè	res m	odifica	tions:	2014	4-01-	30

Annexe B1 - 3 : Rapport de sondage C1-1 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)



Annexe B1 - 3 (suite) : Rapport de sondage C1-1 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)

Transports Québec         RAPPORT DE SONDAGE         Page           Localisation générale :         Notre-Dame-des-Neiges         Dossier:         0020-08-100(17)07A12         SONDAGE:         C1-1														Page 3	de 3	
Localisatio	n général	e: Notre-Dame-des-Neige	25			0	)oss	sier: 002	0-08-10	00(17)07A12	S	ONDAGE: C	1-1			
Endroit: 1	127+068 6	G		Dat	te de d	ébut du s	ond	lage: 201	2-09-13	3	Prof. fin (	type arrêt): 6	0.05 m (	(V)		
TYPES DÉCH CF: Cuillère PS: Piston CR:Carotti TA: Tariàre	ANTILLONNE e fendue stationnai er	Intact	ESSAIS N: Pén X Suv: Scis X Srv: Scis	étrati som	ion sta ètre (k ètre (k	E ndard S Pa) / Pa) (	E: I St: S AG:/ D: (	Module pre Sensibilité Analyse Gi Consolidat	essiom ranulor	étrique F ● V nétrique O V → V	Pv: Poids volu V: Teneuren V: Pourcalcu VI: Limite de li	mique eau (%) ler l. (%) iquidité (%)	C M	oordonn TM NAD 53286	ées (m) 83 (Zon 59.71 r	): ne:7) m (Y)
VR:Vrac	: IN: Indéte	rminé 🛄 Carotte	K: Per	méab	vilité (n	n/s) t		Cisailleme	nt	⊢`v	Vp: Limite de p	lasticité (%)	Ék	4008 évation:	82.78 r	m (×) m (Z)
AU:Autre	DE: Délay		PI: Pres	sion	limite	(kPa) [	Dr: I	Densitë rel	ative	<b>*</b>	: Niveau d'e	au (m)	(G	éodésiqu	e)	
Elev. Prof.	Piézo- métrie	Description	QUE	$\vdash$		<b>T</b> N	f	Réc.		N1/N2/N3/N4	NS EI ESS	Su 40	80	120	160	
(m)		stratigraphique	Str.	État	(m)	Calibre	Sous-6	(cm/cm) (%)	RQD	Rem.sur N/RQD	et notes	W 20	40	60	80	
E		Sable graveleux avec un peu de silt et traces d'aroil		$\geq$	42.04	CF-24		25/45 (56%)		17/38/49	AG					
Ē		de compacité très dense.														
E_44				$\times$	43.55	CF-25	1	16/45	74	24/34/40	1					
Ē								(								
37.67	4	Roc: arénite quarzitique			45 11	CR-1		17/20								
-		grise de très mauvaise			45.31	CR-2		(85%)	۲,							
-46		qualité entre 45.1m et 46.7m, et de qualité		-	45.51	CR-4		(100%)								
Ē		moyenne à excellente à			40.31	0.0.5		(100%)								
Ē		profondeur.				CH-5		40/80	75							
-48				H	47.92		1	(94%)	$\vdash$							
È						CR-6		142/153	85							
È								(93%)								
Esn	-50				49.45	CR-7	1	64/64 (100%)	100							
					50.09	CR-8	1	73/73	100							
E					50.82			(100%)	$\vdash$							
E						CR-9		135/153	63							
-52								(00.0)								
Ę					52.35	CR-10	]	107/107	100							
Ę					52.42			(100%)								
-54		Fracture verticale entre 54			35.42	CR-11		110/110	52							
Ē		m et 54.4 m de profondeu	r. 🔘	H	54 52			(10070)								
Ę						CR-12		153/153	97							
5								(100%)								
-30					56.05	CR-13	1	72/72	100							
28.30				H	56.77		1	(100%)	$\vdash$							
2 5						CR-14		(100%)	98							
§-58				H	58.01	00.45		73/73	=							
64 S					58.74	CR-10		(100%)	51							
						CR-16		132/132	83							
60 22.73								(100%)								
□60.05 ≩-		FIN DU FORAGE														
MBC																
WEO																
2 <b>-62</b>																
0.44.0																
0003																
§_64																
s																

Annexe B1 - 3 (suite) : Rapport de sondage C1-1 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)

ħ	Qu	éb	ec			R	AP	P	0	RT	DE	s	ONI	DA	GE							Page	e 1 de	3	
Loc	alisatio	n gi	énérak	e: N	otre-Dame-des	-Neiges					[	Doss	ier: 002	0-08-1(	00(17)07A12		S	ONDA	GE	C1-2	2				
End	droit: 1	274	+077 6	D	_				Dat	e de d	lébut du s	sond	age: 201	2-09-2	7		Prof. fin (	type a	rrêt)	: 49.2	5 m (	Ŋ			
TYPE CF: PS: CR TA: VR: AU:	ез р'ёсни : Cuillère : Piston : :Carottik : Tarière : Vrac I : Autre I	anti e fei stat er N: I DE:	ILONNE ndue ionnai indéter Délay	ur re miné é	ÉTAT DES ÉCHANT	nuuona ≋ Mé XS XS K F	ESSAR N: P Suv:S Srv:S C: P P1: P	s Péné Scis: Scis: Pem Pres	étrati somé somé néab sion	ion sta ètre (ki ètre (ki ilité (n limite	ndard Pa) / Pa) ( n/s) n (kPa) I	E:   St: : AG:/ C: ( t: ( Dr:	Module pre Sensibilité Analyse Gi Consolidat Cisailleme Densité rel	ranulor ion nt lative	étrique F ● \ métrique O \ 	Pv: Po N: Te N: Po N: Li Np: Li : Ni	oids volur eneur en our calcu mite de li mite de p iveau d'ei	mique eau (% ler l. (% quidité lastici au (m)	6) %) é (% té (?	) 6)	Co M Élé (Gi	532 532 40 vation	1nées 1083 ( 28654. )0844. 1: 81. igue)	(m): Zone 94 m 05 m 16 m	:: <b>7)</b> n(Y) n(X) n(Z)
É	lev.	Pi	ézo-		COUPE GÉO	LOGIQUE	E							É	CHANTILLO	ONS	ETESS	AIS							
F	Prof.	m	étrie		Descriptio	n				Prof.	Type-No	ģ	Réc.	N	N1/N2/N3/N4	E	ssais	Su	4	0	80	120	) 1	60	
	(m) 81.16				stratigraphie	que	St	r.	État	(m)	Calibre	-snos	(cm/cm) (%)	RQD	Rem. sur N / RQD	et	notes	w	2	D	40	60	) (	80	
Ē	0.00	T		Sat	ble argileux et sil he à compact	teux,																			
F		Ш							$\times$	0.76	CF-26	1	19/45	2	2/1/1	1									#
Ę		Ш								1.53	OF 27	1	45/45	15	41810	-									
<b>2</b>		Ш								1.00	UP-27		(100%)	10	4/0/8										+
Ē		Ш							$\times$	2.27	CF-28		40/45	16	3/7/9	AG									#
ŧ	77.67							1	$\times$	3.04	CF-29	1	42/45	22	4/9/13	1									#
Ē	3.49	11		Arg	ile silteuse avec	un peu	17	7	$\ge$	3.49	CF-30	1	(93%) 30/45	19	4/7/12										
E 4		Ш		de: gra	sable et traces d vier, très raide à	dure.	Kł.	B				1	(67%)			1									
Ē		Ш					N.	17	$\times$	4.50	CF-31	1	28/45	18	4/6/12	AG									#
È		Ш					R	6	<	5.35	CE.32	-	33/45	20	4/8/12	-									#
E 6		Ш	¥				19	U	$\frown$		01-02		(73%)	20	4/0/12										
Ē	74.24	Ш					W	Ð	$\times$	6.10	CF-33		45/45	24	4/9/15										#
E	6.85	11	<b>8.108</b>	Arg	jile et silt avec tra	aces de	hh	И	$\times$	6.85	CF-34	1	45/45	23	6/8/15	AG									#
Ę		Ш	01-10	sab	ble et de gravier,	très	11	1		7.00		1	(100%)												
<b>F 8</b>		Ш	2010-	raio	be a dure.			X	$\times$	7.62	CF-35	-	(96%)	24	5/9/15	-									+
ŧ		Ш					M	X																	#
Ę		Ш					113	J.	$\sim$	0 14	05.00		45/45		10/10/10	AG		_							
Ē		Ш					11	X	$\sim$	0.14	UF-30	+	(100%)	30	10/12/18	AG									#
-10		Ш					•//	A																	++
Ę		Ш					14	A	$\sim$	10.66	CE-37	+	43/45	25	5/11/14	-									
Ē		Ш					M	X	$\frown$		01-07	1	(96%)		311014										#
F.		Ш					8	4																	#
E"		Ш					1	Я	$\sim$	12.19	CF-38	+	45/45	19	5/8/11	1									
Ē		Ш						¥,	$\cap$			1	(100%)												#
ŧ	67.45	Ш					14	X																	#
-14	13.71			Silt	argileux avec tra	aces de	UP.	1	$\times$	13.71	CF-39	1	45/45	27	8/11/16	AG									#
5				sab	ole, très raide à d	lure.	11					1	(100%)												#
22 - 22 - 22 - 22 - 22 - 22 - 22 - 22							14	1																	#
5							11	X.	$\times$	15.24	CF-40	]	45/45	29	7/13/16	]							Ħ		Ŧ
- <b>16</b>							11	X					Time												#
sion.							K	X																	#
Second Second			<u> </u>				X		$\times$	16.76	CF-41	-	42/45 (93%)	27	6/12/15	AG									#
16 12			<u>†</u>				W																		#
₫ <u>-18</u>	62.88			0.0	of any la resolution	and de	11	1		10.00			AFIAF			10									#
MBCs	16.28		10	sab	de, raide à dure.	aces de	1	X	$\ge$	10.28	CF-42	$\left  \right $	(100%)	18	3/6/12	AG		-							Ŧ
ğ			2013.0				19	X																	#
e e							X	Ż	2~0																#
RE R	marque	5:		. 1.1	al bash			v						- 4			Équipe Type di Type di Rappor	ment o e foraç e mart t d'éno	de fo ge: N eau ergie	orage: Multi-fi : 63.5 e: non	CME orage kg mesu	-55 iré	2011	01.0	
≴_Te	chnicier	r: Ja	acques	s Hame	ei, tech.			Vêr	ne p	par: So	ophie Pel	ietie	r, ing. M.S	c.A.			Date d	es der	niêr	es mo	odifica	tions:	2014	-01-3	U.

Annexe B1 - 4 : Rapport de sondage C1-2 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)

Tra	Que	ébec	60 60 60 60		RA	PF	<b>0</b>	RT	DE	s	ONI	)A(	GE				P	age 2 de	3
Loc	alisation	génér	ale: N	otre-Dame-des-Neig	jes				0	)oss	ier: 0020	)-08-10	00(17)07A12	S	ONDA	GE: C1	-2		
End	iroit: 12	27+077	6D	_			Dat	e de d	ébut du s	iond	age: 2012	2-09-27	7	Prof. fin (t	type ar	τêt): <b>49</b>	.25 m (V)		
TYPE OF: PS: CR: TA: VR: AU:	SDÉCHA Cuillère Piston s Carottie Tarière Vrac II Autre D	NTILLON fendue stationn r N: Indé )E: Dél	NEUR aire terminé ayé	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	8 ES N: X Su X Srv K: Pl:	SAIS Pér V: Scit r: Scit Per Pre	nétrati ssom ssom méab ssion	ion star ètre (kl ètre (kl ilité (n limite	E ndard ( Pa) / Pa) ( Vs) 1 (kPa) [	E: M St: S AG: / C: ( C: ( Dr: D	Nodule pre Sensibilité Analyse Gr Consolidat Cisaillemer Densité rel	anulor anulor ion nt ative	étrique F ● V nétrique O V ⊢ V ⊢ V	V: Poids volur V: Teneur en ( V: Pour calcul VI: Limite de lik Vp: Limite de pi : Niveau d'ea	nique eau (% ler l. (% quidité lasticit au (m)	6) %) (%) é (%)	Coor MTM Éléval	données NAD83 ( 5328654. 400844. ion: 81. lésique)	(m): Zone:7) 94 m (Y) 05 m (X) 16 m (Z)
É	lev	Piézo	Ĵ.	COUPE GÉOLOG	SIQUE		Τ					É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS		(0.00	conque)	
P	rof.	métri	e	Description				Prof.	Type-No	Ę.	Réc.	N	N1/N2/N3/N4	Essais	Su	40	80	120 1	60
	(m)			stratigraphique		Str.	État	(m)	Calibre	-sno	(cm/cm) (%)	RQD	Rem.sur N/RQD	et notes	w	20	40	60	80
-22 -26 -28							X	19.81	CF-43	ŝ	33/45	13,	3/5/8				× × × × × × × × × × ×	<ul> <li>✓ 122</li> <li>✓ 122</li> <li>104</li> <li>✓ 112</li> <li>104</li> <li>✓ 112</li> <li>8</li> <li>106</li> <li>8</li> <li>104</li> <li>116</li> <li>104</li> <li>114</li> </ul>	4 × 1 (154
-30																	*0	× 118 × 13 × 124 × 124 × 126	2
11-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1		- A DE LE	Sci	ssomètre cassé à la in à 38 m.			X	38.10	CF-44	-	45/45 ((100%))	4	0/0/4					× 118 ×	144
	41.56 39.60		Silt	argileux avec un peu	de	H		39.60	CF-45	$\left  \right $	45/45	2	0/0/2	AG					
			sat très	ole et traces de gravier s raide.	r			41.10	CF-46		(100%) 45/45 (100%)	5	0/0/5						
§-42					6	•	1				( and the second se								

Annexe B1 - 4 (suite) : Rapport de sondage C1-2 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)

Localisation pinnais:         Notes-Dame-des-Neiges         Dorser:         0004-001 (17/14/2         SOUADEC C-12           Endroi:         1274/07.40         Date de didut du sondage:         2012-0527         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Elf 400 (17/17/42)         Date de didut du sondage:         2012-0527         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Elf 400 (17/17/42)         Elf 400 (17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Elf 400 (17/17/42)         Elf 400 (17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Elf 400 (17/17/42)         Elf 400 (17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Elf 400 (17/17/42)         Elf 400 (17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Elf 400 (17/17/42)         Elf 400 (17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)         Elf 400 (17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Chroni:         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)         Elf 400 (17/17/17/42)         Prof. In (type anit): 43.55 m (M)           Elf 400 (17/17/17/17/17/17/17/17/17/17/17/17/17/1		Transport Qu	ébec	* *	R	APP	o	RT	T DE	s	ONI	DA	GE					Pag	je 3 de	3	
Ender:         1274/07 80         Date de début du sontage: 2012/06-27         Port. 6n type amél: 49.25 m (M)           1100 dite Musian CR Curatier R. Tartier R. Curatier R. Tartier M.	ſ	Localisatio	n généra	le: I	Notre-Dame-des-Neiges				(	)oss	sier: 002	0-08-1(	00(17)07A12	S	ONDA	GE: C	1-2				
1712 02:00x1LUX08       E1:00 (controls in the interval of the interva		Endroit: 1	27+077	6D			Da	te de d	lébut du s	iond	lage: 2012	2-09-27	7	Prof. fin (	type a	rrêt): 49	9.25 n	n (V)			
Else         Prot. métrie         Description stratignamium         Str.         Image: model in the stratignamium         Str.         Image: m		TYPES DECH CF: Cuillère PS: Piston CR:Carotti TA: Tarière VR: Vrac AU: Autre I	ANTILLONN e fendue stationna er e IN: Indéte DE: Déla	eure aire arminé ayé	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS E Intact N Remanié X S Perdu X S Carotte H Autre F	ESSAIS N: Pén Suv:Scis Srv:Scis K: Pen PI: Pres	étrat ssom ssom méat ssion	ion sta ètre (k ètre (k pilité (n limite	ndard Pa) Pa) n/s) (kPa)	E:   St: \$ AG:/ C: ( C: ( Dr:	Module pre Sensibilité Analyse Gi Consolidat Cisailleme Densité rel	essiom ranulor ion nt lative	étrique F ● V métrique O V ⊣ V ⊢ V	V: Poids volur V: Teneur en V: Pour calcul VI: Limite de li Vp: Limite de p : Niveau d'es	mique eau (% ler l. (% quidité lastici au (m)	6) %) é (%) té (%)		Coordo MTM N 53 4 Élévatio (Géodé	nnées AD83 ( 28654 100844 n: 81 sique)	s (m): (Zon .94 n .05 n .16 n	e:7) n(Y) n(X) n(Z)
Prof.         metric         Description         Str.         Prof.         Number Str.         Fund (m)         Number Str.         Essais	ſ	Élev.	Piézo		COUPE GÉOLOGIQU	E						É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS						
(m)       stratigraphique       (m)       Caller (g)       (m)       ROD       N / ROD       et notes       W       20       40       60       80         38.46		Prof.	métrie	•	Description	Str	+	Prof.	Type-No	ŝ	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem_sur	Essais	Su	40	80	) 12	<u>10</u>	160	
34.61 22.70 24       Graver avec traces de suble et d'argle, tris dense.       4.70 2.70 2.70 2.70 2.70 2.70 2.70 2.70 2		(m)			stratigraphique		Êta	(m)	Calibre	snog	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40	) 6	0	80	
42.70       Graver avec faces dense.       1       1       0.70	ŧ	38.46				11				00											
44       46       34       30       45       30 <td< th=""><th>Ē</th><th>42.70</th><th></th><th>Gra</th><th>avier avec traces de ble et d'argile, très dense.</th><th>1.</th><th></th><th>42.70</th><th>CF-47</th><th>1</th><th>0/10 (0%)</th><th></th><th>50 50/10cm</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></td<>	Ē	42.70		Gra	avier avec traces de ble et d'argile, très dense.	1.		42.70	CF-47	1	0/10 (0%)		50 50/10cm								
46       34.93       Noc. steinte quazzique grae de qualié mauvaise à borne.       46.33       CR-1       2050.       3050.         46       34.93       Noc. steinte quazzique grae de qualié mauvaise à borne.       46.23       CR-4       2044.       0         48       31.91       FINDU FORAGE       47.02       CR-4       133.130       51         56       56       S6       S6       S6       S6       S6       S6         56       S6       S6       S6       S6       S6       S6       S6         56       S6       S6<	F				-	1.															
46     3433     08.1     20.94     0       46     31.91     90.00     31.93     51       48     31.91     70.00     20.94     0       49.25     FINDU FORAGE     20.94     0       50     53     54     55       54     54     54	Ē	-44				1	$\geq$	44.09	CF-48		12/20		45/50								
46       34.93       Re:       20.94       0         46.23       Re:       42.33       CR:1       20.94       0         910       grise de qualité mauvaise à borne.       42.33       CR:2       131180       57         48       31.91       FN DU FORAGE       64       130130       65         49.25       FN DU FORAGE       100%       64       130130       65         58       56	ŧ					• •					(00%)		outoem								
46       34.33       1       CR-1       (24%)       0         40.23       Proc. avinte quantities à bonne.       40.23       CR-2       (33/13)       51         48       31.91       40.23       CR-4       (33/13)       51         48       47.95       CR-4       (33/13)       65         48       31.91       FN DU FORAGE       CR-4       (33/13)       65         54       54       55       FN DU FORAGE       FN DU FORAGE       FN DU FORAGE       FN DU FORAGE         54       54       FN DU FORAGE         54       FN DU FORAGE	ŧ							45.39		$\mathbf{I}$	20/84										
40:23       Proc. arbitr quarticipa         griss de qualificationais à bonne.       47.02         44       77.02         47.02       CR-2         47.02       CR-2         47.02       CR-2         48       23.91         49.25       FIN DU FORAGE         50       Fin DU FORAGE         52       Fin DU FORAGE         54       S8         56       S8         60       S8         60       S8	Ē	46 34.93							CR-1		(24%)	0									
48     CR-2     (06%)     59       4151     47.50     CR-4     (100%)     85       42.25     PIN DU FORAGE     F     F       50     53     F     F       54     F     F     F       56     F     F     F       57     F     F     F       58     F     F     F       59     F     F     F	E	46.23		Ro	<ul> <li>c: arénite quarzitique se de qualité mauvaise à</li> </ul>	$\mathbb{Z}$	8	46.23		]	133/139										
46       23/4       <	E			bo	nne.				CR-2		(96%)	51									
31.91     47.36     CR.4     130130     65       40.25     FINDUFORAGE     100%     64	ł	40				X		47.62	CR-3		23/34	44									
3191       Crew       1000%       00       000%       00	F							47.96	CRA		(68%)										
4925 FINDUFORAGE	F	31.91					1		CR-4		(100%)	80									
	Ē	49.25		FIN	NDU FORAGE		╏┓			$\vdash$											
	Ē	50																		+	
	È																				
	ŧ																				
	F	53																			
	F	-Jz																			
	Ē																				
54 55 56 56 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50	Ē																				
	ŧ	54																			
	ŧ																				
	F																				
	F	50																			
	F																				
	5																				
	2																				
	ģ	58																		+	
	8 20																				
	D/MAS #																				
	100																				
	8	-00																			
	100																				
	ğ																				
	į	62																			
	8																				
	action of																				
	ŝ	-04																			

Annexe B1 - 4 (suite) : Rapport de sondage C1-2 (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)

Transpor Qu	ts Iébec	6 0	RAP	<b>PO</b>	RT I	)E	SON	DA	GE				Pa	age 1 de	:3
Localisation	n générale	: Bas Saint-Laurent - S	ecteur argile	dure		Doss	sier: 032	(032)1	2	SOND	AGE:	F-05	5-SW		
Endroit: C	ulée Oue	st, Riv. Trois-Pistoles, Not	tre-Dame-des	-Deig	jedse début d	u sono	dage: 201	4-07-1	1	Prof. fin (type a	arrêt):	30 n	n (R)		
CF: Cuillère PS: Piston s CR: Carottie	NTILLONNEU fendue stationnain er	PR ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	N: Pén X Suv:Scis	étratio somèl	on standard tre (kPa) tre (kPa)	E: 1 St: 9 AG#	Module pre Sensibilité Analyse Gr Consolidati	ssiomi anulon	étrique P ● W nétrique ◯ W → W	v: Poids volumique /: Teneur en eau ( /: Pour calculer l <sub>e</sub> ( /: Limite de liquidi	e %) (%) 16 (%)		Coords UTM N	nnées ( AD83 (Z (26280.)	(m): one:19) 00 m (Y)
VR:Vrac II AU:Autre D	N: Indéten DE: Délayé	miné Carotte	K: Perr Pl: Pres	néabil sion li	lité (m/s) limite (kPa)	τ C Dr: D	Cisaillemer Densité rel	nt ative	₩ ₩	/p: Limite de plastic Niveau d'eau (m	ité (% 1)	)	2 Élévatio (Géodési	184260.( n: 86.( que)	X0 m.(X) 34 m.(Z)
Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOG	IQUE					É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS					
Prof.	métrie	Description	Str	÷	Prof. Type-	Not	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem. sur	Essais	Su	40	80	120	160
86.64		stratigraphique		Ē,	(m) Calib	re	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40	60	80
- 2 		Forage destructif													
											Ħ				
2 Remarques	: Forage l'argile d	de grand diamètre (Calibre : dure.	SW) pour éch	antillo	onner des tu	bes m	inces de 5	" de dia	amètre dans	Type de sor Équipemen Type de ma	ndage t de fo irteau	: For rage (kg):	age au d :: : 63.5	iamant	
Technicien	: Francois	Tremblay, tt.p.p.	Vérifi	é par:	Antony Ga	gné, in	g.		Ap	prouvé par:					

Annexe B1 - 5 : Rapport de sondage F-05-SW (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transports		_
Óu tábar	- e.	
Ouebec		- E

#### RAPPORT DE SONDAGE

Page 2 de 3

Localisation générale : Bas Saint-Laurent - Secteur argile dure

Dossier: 032(032)12

SONDAGE: F-05-SW

Prof. fin (type arrêt): 30 m (R)

Endroit: Culée Ouest, Riv. Trois-Pistoles, Notre-Dame-des-Beigede début du sondage: 2014-07-11

	Diázo	COUPE GEOLOGIQUE		I .					É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS									
Prof.	métrie	Description			Deve	T N	÷	Réc.		N1/N2/N3/N4	Farria	S	u 4	40	8	0	120	1	60	_
(m)		stratigraphique	Str.	Ę	(m)	Calibre	÷.	(cm/cm)	RQD	Rem. sur	et notes	M	v .							_
				÷Ш			ŝ	(%)		N / RQD		L.		20	4		60			_
73.14												Ħ	$\square$	П						Ŧ
- 13.50		Silt argileux avec traces de sable et gravier gris			13.50	TM-01		41/64				Ħ	Ħ	Ħ						1
-14		sable et gravier, gris.						(64%)				$\mathbb{H}$	╈	╢	++-			++	┉	+
F I												F	$\square$					$\mp$		Ŧ
È !												Ħ	Ħ	t						+
╞╴╵												$\mathbb{H}$	++	+						+
ļ l												Ħ		1						t
-												$\vdash$	++	$^{+}$	++-			++-		+
-16												Ħ	Π							Ŧ
E												Ħ								+
-				777	16.49		1	52/72				$\vdash$	++	+					┞┼┼	╀
t l						TM-02		(72%)				Ħ		1				#		t
F				111								$\vdash$	+	╢	++-			++	┼┼┼	+
ļ ļ												Ħ		1						Ţ
10												$\vdash$	++							+
-					17.96	TM-03		21/46											H	F
t l				27/2			1	(10/6)				Ħ	Ħ						Ħ	+
-												$\vdash$	++	╢				++-		╀
t l												Ħ		1						t
-												$\vdash$	++	+	++-			++-	┝┼┼	+
F I												H	$\square$					$\square$		Ŧ
-20												H								+
F												$\square$	$\square$	+						Ŧ
È l												Ħ	Ħ	t				#		+
65.40												$\mathbb{H}$	++	╢				++-	┼┼┼	+
21.24		Silt argileux avec traces de		11	21.24	TM-04	1	29/29					$\square$							Ŧ
E		sable, gris			21.53	TM-05	1	25/25				$\vdash$	$\square$					++-		+
-22								(100%)				$\square$	$\square$	+			-			Ŧ
t l												Ħ		Ħ				#		1
╞┊												$\mathbb{H}$	++	╢				++-	$\left  \right  \right $	+
F													$\square$							Ŧ
E												$\vdash$	$\square$	Ť	++-			++-		+
F												$\square$	$\square$	+						╞
-24												Ħ	Ħ						Ħ	t
-												+	+	+	++			++	++	+
F												Ħ	$\parallel$	Ŧ	$\mp$			#	Ħ	Ŧ
t l													$\square$							+
ŀ												$\mathbb{H}$	H	$\mathbb{H}$	++			+	H	Ŧ
Ľ												Ħ	Ħ	1					Ħ	t
20												+	+	╢	++		+	++	++	+
-20												Ħ	$\square$	Ħ	++				Ħ	Ŧ
t l												$\vdash$	$\square$							+
F													$\square$	$\mathbf{I}$						Ŧ
50.24													$\pm$							+
- 27.33		Argile et silt avec traces de		7//	27.33		1	62/62				$\mathbb{H}$	H	+	++			+		Ŧ
50.00		sable, gris		1		TM-06		(100%)				Ħ	Ħ	1	#			#	Ħ	t
28 27.96		Fin du Forage		(11)								$\vdash$	+	╢			+	++-		+
F		-										Ħ	Ħ	1	$\mp$			#	Ħ	ŧ
t l												$\vdash$	$\mathbb{H}$	$\pm$					H	+
-																				-

Annexe B1 - 5 (suite) : Rapport de sondage F-05-SW (provenance MTMDET – campagne 2014)





Annexe B1 - 7 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-01

Annexe B1 - 6 : CT-SCAN TM-01 - axe coronal





Annexe B1 - 9 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-02

Annexe B1 - 8 : CT-SCAN TM-02 - axe coronal



Annexe B1 - 10 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal



Annexe B1 - 11 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-03





Annexe B1 - 13 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-04

Annexe B1 - 12 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal




Annexe B1 - 15 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-05

Annexe B1 - 14 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal





Annexe B1 - 17 : Coupes verticales – CT-SCAN TM-06

Annexe B1 - 16 : CT-SCAN TM-03 - axe coronal

Transport Qu	ts ébec		3	R.	AP]	PC	<b>DR</b>	T DI	E (	SON	DA	GE				I	Page 1 o	de 3
Localisation	général	e: B	las Saint-Laurent - S	ecteur a	argile	dure		0	)oss	ier: 032	(032)1:	2	SOND	AGE:	F-05	5-PW		
Endroit: C	ulée Oue	est, Riv	v. Trois-Pistoles			Dat	e de d	ébut du s	ond	age: 201	4-07-0	9	Prof. fin (type	arrêt):	44.6	66 m (V)		
CF: Cuillère PS: Piston s CR: Carottie TA: Tarière	NTILLONNE fendue stationnai r	ire	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	s es: N: X Sur X Srv K:	Péni V:Scis r:Scis Penr	étrati somé somé néab	on sta ètre (kl ètre (kl ilité (n	E ndard S Pa) / Pa) ( n/s) 1	E: N St: S AGA C: C	lodule pre iensibilité inalyse Gr ionsolidati isaillemer	ssiomé anulon on nt	étrique P ● W nétrique ○ W — W ↓ W	v: Poids volumiqu /: Teneur en eau /: Pour calculer ( /: Limite de liquidi /o: Limite de plasti	e (%) (%) ité (%) cité (%)		Coord UTM I	lonnées VAD83 ( 5326280 484260	s (m): Zone:19) ).00 m (Y) ).00 m (X)
AU:Autre D	)E: Délay	né –	Autre	PI:	Pres	sion	limite	(kPa)	Dr: D	ensité rel	ative		Niveau d'eau (n	n)	<b>^</b>	(Géodé	ion: at sique)	.64 m (2)
Élev.	Piézo-		COUPE GÉOLOG	GIQUE							É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS					
Prof.	métrie		Description		e 1-	t	Prof.	Type-No	éch.	Réc.	N	N1/N2/N3/N4	Essais	Su	40	80	120	160
(m)			stratigraphique		su.	Étal	(m)	Calibre	ons	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40	60	80
86.64		Sable	e avec des traces de :	silt et 💡	ΞĒ				ŝ									
		de gr Silt a sable comp	avier, gris, compact. wec un peu de sable : kux, un peu d'argile et sact. ne récupération. riaux pour être carrotès	à des cles			10.36	CR-0 PQ3		0/78 (0%)								
73.64					1.		.2.00											
Remarques	Remarques: Forage (Calibre PW) avec carrotage de l'argile dure en PQ3. Type de sondage: Forage au diamant Équipement de forage: Diedrich D-50 Type de marteau (kg): 63.5																	

Annexe B1 - 18 : Rapport de sondage F-05-PW (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transports		
Québec	÷	÷

## RAPPORT DE SONDAGE

Page 2 d	e 3

Localisation générale : Bas Saint-Laurent - Secteur argile dure

Endroit: Culée Ouest, Riv. Trois-Pistoles

Dossier: 032(032)12

SONDAGE: F-05-PW

Date de début du sondage: 2014-07-09

Prof. fin (type arrêt): 44.66 m (V)

Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOGIQUE	_		$\vdash$			-	<b>D</b> ′	É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS	T				20	400	
Prof.	métrie	Description	S	tr	Ħ	Prof.	Type-No	ş	Rec. (cm/cm)	Ν	N1/N2/N3/N4 Rem. sur	Essais	Su	40	80	1	20	160	
(m)		stratigraphique			÷	(m)	Calibre	snog	(%)	RQD	N / RQD	et notes	w	20	40		60	80	
-		Silt argileux à silt et argile avec	h	И			0.0.4	0,	71/152				Ħ	ŦŦ	Ħ		Ħ	Ħ	ŦŦ
F		des traces à un peu de sable et des traces de gravier, gris	1	1			PQ3		(47%)								1		$\mp$
-14		dure.	Uł	Ы															++
-			1	ſ.	┝	14.18							$\vdash$				╂┼┼		++
F			1	11			CR-2		64/76 (84%)								1		$\square$
Ł			٨l	И	μ	14.04	PQ3		()										#
ŀ			ď.	•		19.09	CR-3		45/76				$\left  \right $	+++	+++	$\vdash$	+++	+++	++-
F			И	•			PQ3		(09%)								111		$\square$
-16			Ľ/	ſ		15.70			42/76										++
-			fili	1			PQ3		(55%)						+++		╂┼┼		
F			ħ	Ł		16.46		1	40.720								1		$\square$
t i			1	И			CR-5		(64%)				Ħ						#
ŀ			ИŤ	И	$\vdash$	17.22	1.45						$\left  \right $				+++		++-
ļ.			ŀŀł	1										#			111		#
18			11	řIJ			CR-6		94/152										$\pm$
F			1	K			PQ3		(62%)										
Ę –			1	Z	1									##			111		#
Ł			1	Į.		18.74		1		1									
F		Bloc de 35 cm de diamètre.	Uł	11													┼┼		
ţ.			Hł	4			CR-X		35/152 (23%)					##			111		Ħ
20			11	¥1			PQ3		· · ·										++-
F				И		00.00													
Ł			И	k		20.26	CR-7		52/62										#
ŀ			H	61	┝	20.00	PQ3		(0476)				$\left  \right $	+++	+++	$\left  \right $	╂┼┼	+++	++-
F						20.00	0.000		37/90								111		$\mp$
Ł			ΠD	1			PQ3		(41%)										#
-			11	И	H	21.78							$\left  \right $		+++		+++		++-
-22			, / <b>*</b>				CR-9		35/73										
Ł			X	ť.		22.51	PQ3		()										
ŀ			11/2	1		22.01	CR-10		82/82						+++		+++		++-
Ę –			nŀ	1			PQ3		(100%)					##			111		#
Ł			4	2e		23.33		1		1									+
-			М	J.					142/142								+++		
-24			۰ľ	ſ,			CR-11 PO3		(100%)					##		<u> </u>	##		#
-				1.			1.40								+++		+++		++-
-			1	Y	╟	24,75										##			Ŧ
L			И	И									Ħ						#
-			łł				CR-12		161/161				$\left  \right $	+++	+++		+++	+++	++-
			X	1			PQ3		(100%)				Ħ	#		$\square$	##		Ħ
-26			[]}	1									Ħ	#		<u> </u>	₩		#
5			ľ.	1	┝	26.36							$\left  \right $	+	+++	$\left  \right  $	₩	+	++
-	e 4			1									Ħ	#		Ħ	##	##	Ħ
27.0	00	Silt et argile avec des traces de	X	11			CR-13		123/152				H			$\blacksquare$	╂╫		+
F		sable, gris, raide.	Į,	U			PQ3		(81%)				$\square$	#		$\square$	$\prod$		$\square$
58	76		X	1															#
-28 27.	88	Fin du forage à 27,88m. Arrêt	Γ					1					H	+	+++	HŦ	₩	+++	H
F		Volontaire.											Ħ	#		Ħ	##	##	#
																	₩		++
-																			$\square$

Annexe B1 - 18 (suite) : Rapport de sondage F-05-PW (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transport	s ébe	C 11 11	RA	AP]	PO	R	L DI	Ξ;	SON	DA	GE			P	age 1 d	e 3	
Localisation	généra	le : Bas Saint-Laurent - Se	ecteur a	argile	dure		D	oss	sier: 032(	032)1	2	SOND	AGE: FZ-	05			
Endroit: Cu	ilée Ou	uest, Riv. Trois-Pistoles			Date	de dé	ébut du s	ond	lage: 2014	1-07-0	7	Prof. fin (type	arrêt): 44.0	66 m (R)			
TYPES DÉCHAN CF: Cuillère f PS: Piston st CR: Carottier TA: Tarière VR: Vrac IN AU: Autre DE	TILLONN fendue ationn: : Indét E: Déla	IEUR ÉTAT DES ÉCHANTILLONS aire ///// Intact Remanié Perdu eminé // Carotte Autre	N: X Suv X Suv K: PI:	Péni Péni Scis Scis Pern Pres	étratio somèt somèt méabil ssion li	n stan tre (kF tre (kF ité (m imite (	E ndard S Pa) Α Pa) C (s) τ (kPa) D	E: N St: S AGA C: C C: C Dr: D	Module pre Sensibilité Analyse Gra Consolidati Cisaillemen Densité rela	anulon on t tive	étrique P ● W nétrique ○ W — W — W ₩ ₩	<ul> <li>Poids volumiqu</li> <li>Teneur en eau</li> <li>Pour calculer l,</li> <li>Pour calculer l,</li> <li>Limite de liquidi</li> <li>Limite de plastic</li> <li>Niveau d'eau (n</li> </ul>	e (%) (%) té (%) sité (%) n)	Coordk UTM N 5 Élévatio (Geodes)	années AD83 (7 326280. 184260. an: 86. aue)	(m): Zone:19 00 m () 00 m () 64 m (2	3) 1) 1) 1)
Élev.	Piézo	COUPE GEOLOG	IQUE		$\vdash$			£	Réc	E	CHANTILLO	NS ET ESSAIS	e. 40	90	120	160	
(m)		stratigraphique	-	Str.	État	Prof. (m)	Type-No Calibre	ous-éc	(cm/cm) (%)	N RQD	Rem. sur N / RQD	Essais et notes	W 20	40	60	80	
- 2 - 2 - 4 		Sable avec des traces de s de gravier, gris, compact. Silt un peu de sable à sable un peu d'argile et des trace gravier Présence de coquillages da CF-6	eux, ans			4.57 5.33 6.10 7.62 8.38 9.14	CF-1 B CF-2 B CF-3 B CF-5 B CF-6 B CF-6 B CF-7 N CF-8	<u>.</u>	25/81 (41%) 30/81 (49%) 45/81 (74%) 55/81 (90%) 45/81 (74%) 45/81 (74%)	11 10 10 18 17 19 41 41	7/5/6/6 4/4/6/8 3/4/6/5 4/7/11/13 4/7/10/11 5/8/11/13 9/10/25/23 9/10/14/19						
-12						12.19	в CF-9 В		50/81 (82%)	26	8/10/16/21						
Remarques: Technicien:	Remarques: Forage Standard (Calibre N) avec SPT (Analyseur de battage) et un piézomètre bas couche argile raide.       Type de sondage: Forage au diamant Équipement de forage: Diedrich D-50 (Auto) Type de marteau (kg): 63.5         Technicien: Francois Tremblay, t.t.p.p.       Vérifié par: Antony Gagné, ing.       Approvué par:																

Annexe B1 - 19 : Rapport de sondage FZ-05 (provenance MTMDET – campagne 2014)

Transpo	rts uébec	R	AP	PC	DR'	T DI	E (	SON	DA	GE				P	age 2	de 3	3
Localisatio	on général	e : Bas Saint-Laurent - Secteur	r argile	dure	9	0	)oss	ier: 032(	032)12	2	SONDA	GE:	FZ-05				
Endroit:	Culée Ou	est, Riv. Trois-Pistoles		Da	te de d	ébut du s	ond	age: 2014	1-07-07	7	Prof. fin (type a	rrêt):	44.66	m (R)			
Élev.	Piézo-	COUPE GÉOLOGIQUE		+			É	Páo	É		NS ET ESSAIS		40	90	430	0 4	100
(m)	metrie	Description stratigraphique	Str.	tat	Prof. (m)	Type-No Calibre	as-écl	(cm/cm)	N RQD	Rem. sur	Essais et notes	Su	40				
		Cilt amilaux auso der tracer de	L	÷			SoL	(%)		N / RQD		**	20	40	60	)   	80
E		sable et de gravier, gris, dure.	UX)														
E	::		W)	$\overline{\nabla}$	13.72	CE 10	1	45/61	27	7/11/18/20							
2	: :		H)			B		(74%)	21	111110/20							
Ł	: :		И.	1													1
Ę	: :		H.														1
Ę	: :		4.		10.24	CF-11		50/61 (82%)	31	9/12/19/25	Ce = 1.44 (N <sub>60</sub> = 45)						1
-16			•1;	Ê		B	1										+
F	[• <mark>]</mark> •		H1														
E			11	$\overline{\nabla}$	16.76		1	55/81			Ce = 1.44 (N <sub>60</sub> = 45)						
E	0 20 0		K			CF-12 B		(90%)	31	10/13/18/22							
Ł			K														
-18			Иų														+
ţ.	· ·		K),	$\mathbb{N}$	18.29	CF-13	]	55/61	33	9/13/20/26	Ce = 1.51 (N <sub>60</sub> = 50)						1
Ę			1	$\square$		В		(80 %)									1
Ę	1.		11														1
F	: :			L	19.81						Ce = 1.43 (N., = 58)						1
-20				1X		CF-14 B		50/61 (82%)	41	13/17/24/28							
E			Κł	ſ													
E	1.		11	1													
Ł	• <mark>•</mark> •		11	$\nabla$	21.33	CE-15	1	50/61	32	8/13/19/25	Ce = 1.47 (N <sub>60</sub> = 47)						1
-22	: :		14			В		(82%)		0101020							
Ę	:		[]*	1													1
Ę			[]/		22.05												1
F	E		14		22.60	CF-16		55/61 (90%)	38	11/16/22/27	Ce = 1.39 (N <sub>60</sub> = 53)						1
F			1X	F													
-24			111												+++		
-		De couleur rosé par endroit	I.X		24.38		1	61/61			Ce = 1.40 (N <sub>60</sub> = 42)						
6-		be obtical rose par charon.		$\square$		CF-17 B		(100%)	30	8/12/18/22							
8- -	::		K														1
69			D41														1
5- <b>26</b>	: :	Lit de sable fin dans CF-18.		Ł	26.17						Ge = 1.37 (N = 41)				Ħ		++++
	: :		[]]]]	X		CF-18 B		61/61 (100%)	30	10/13/17/21		Ħ				#	
59.64	l.	Silt et argile avec des traces de	Ш	F			1								Ħ	$\ddagger$	1 ++++
		sable, gris, raide.			27.43						Ce = 1.50 (N-= 22)	Ħ			Ħ	Ħ	
20	•					CF-19 B		61/61 (100%)	15	6/7/8/9	(190 - 111)						
-20	•		[]]]	F			1										
00000	•		111														
5-			WX.	$\sim$													

Annexe B1 - 19 (suite) : Rapport de sondage FZ-05 (provenance MTMDET – campagne 2014)

calisatio	n générale :	Bas Saint-Laurent - Secteur a	argile	dure	•	D	ossier: 032	(032)12	2	SONDA	GE: I	FZ-05			
ndroit: (	Culée Oues	t, Riv. Trois-Pistoles		Dat	e de d	ébut du s	ondage: 201	4-07-07	7	Prof. fin (type a	rrêt): 4	44.66	m (R)		
Élev	Piézo-	COUPE GÉOLOGIQUE						É	CHANTILLO	NS ET ESSAIS					
Prof.	métrie	Description			Prof.	Type-No	H Réc.	N	N1/N2/N3/N4	Essais	Su	40	80	120	160
(m)		stratigraphique	Str.	État	(m)	Calibre	(cm/cm)	RQD	Rem. sur N / RQD	et notes	w	20	40	60	80
		2	ИN	$\sim$	28.96	CF-20	61/61	13	3/5/8/8	Ce = 1.52 (N <sub>60</sub> = 20)					
	• • •	ł	112			В	(100%)								
)		Į	X												
			11.	1											
	• •		97	$\nabla$	30.48	CE-21	61/61		1/4/5/8	Ce = 1.48 (N <sub>60</sub> = 13)	1				
		k	XX			B	(100%)	°	1/10/0						
			X)												
	• •		X												
2	-		11	$\mathbf{\nabla}$	32.00		61/61			Ce = 1.50 (N <sub>60</sub> = 16)					
			11			CF-22 B	(100%)	11	3/4/7/6		$\left  \right $				
	• •		11												
			X	1											
			44	b	33.52		-			Ce = 1.51 (Nm = 15)					
ı		b	19	1X		CF-23	(100%)	10	2/4/6/5						
	•		Ŵ	F											
	•	ļ	11	1											
	• 1 •		Ŵ	L											
			X	X	35.05	CF-24	61/61	8	1/4/4/5	Ce = 1.50 (N <sub>60</sub> = 12)					
	• •		1X)	$\vdash$		В	(10076)								
5			12												
			A A	1											
	• •		11		36.58	05.05	61/61	6	1/0/8/0	Ce = 1.44 (N <sub>60</sub> = 9)					
			11			B	(100%)		1/0/0/6						
	•		11	1											
		l l	Ŵ	1											
8			X		38.10		81/81			Ce = 1.50 (N <sub>60</sub> = 16)					
	<u> </u>		X	払		CF-26 B	(100%)	11	1/5/6/8						
			97.												
			22	1											
			11												
)	11111		11												HÌ
			W	$\sim$	40.23	05.07	61/61		51010144	Ce = 1.45 (N <sub>90</sub> = 25)					
		Quelques lits de sable fin d'environ 3@5cm d'écoissour		$\mathbb{A}$		B	(100%)	11	0/8/8/11						
		entre 40,50 et 42,00m.	11							0 - 4 - 5 - 5 - 5 - 5 - 5 - 5 - 5 - 5 - 5					
	••••				41.14	CF-28	61/61	14	5/6/8/9	Ge = 1.45 (N <sub>60</sub> = 20)					
			H	$\vdash$		В	(10070)	$\left  \right $							
			19	1											
	•••		111	1							Ħ				
				$\nabla$	42.67	CE-29	61/61	0	3/3/8/7	Ce = 1.47 (N <sub>60</sub> = 13)	1++				
			W			B	(100%)	-	aaan						
	• • •	2	NA	1							Ħ				
		4	19	1							<u>⊨</u>				
44.20	1:::	Silt avec un peu de sable et de			44.20	CE-20	20/44	<b>_</b>	17/30/50	Ce = 1.55 (N <sub>60</sub> = R)					
		mavier aris très dense	пц	IА	1	0,00	(45%)	<b>N</b>	pr 14 cm						

Annexe B1 - 19 (suite) : Rapport de sondage FZ-05 (provenance MTMDET – campagne 2014)

# Annexe B2 : Pressions interstitielles (piézométrie)

Annexe B2 - 1 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage F1 (provenance MTMDET)	280
Annexe B2 - 2 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage F2 (provenance MTMDET)	281
Annexe B2 - 3 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage C1-2 (provenance MTMDET)	281
Annexe B2 - 4 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage FZ-05 (provenance MTMDET)	282
Annexe B2 - 5 : Schéma d'installation du piézomètre dans FZ-05 (40,50 m de profondeur)	282

ENDROIT: DOSSIER:	Notre-Dame-des-Neiges 0020-08-100(017)07A										
	Forage No.:		F-1			F-1			F-1		
	Type et No. :	T.N.	petur5301			petur7080			petur7059		
	Date d'installation:		2008-04-17			2008-04-18			2008-04-18		
	Profondeur dans le sol:		29.75			19.95			8.00		
	Longueur totale:		N/A			N/ A			<u>N/A</u>		
	Élévation du T.N.:		84.82	,		84.82	<b>,</b>		84.82		Demonstrate
	Élévation de la pointe:	hw 📔	55.07			64.87			76.82		Remarques
	Élévation du dessus:		N/A			N/A			<u>N/A</u>		
	Cste d'étalonnage:		1.00			1.00	Į		1.00		
	Correction d'inertie:		0.00			0.00	]		0.00		
Date de		Lecture			Lecture			Lecture			
lecture	Nombre de jours	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	
2008-04-17	0	289.00	29.46	84.53		-	-		-	-	
2008-04-18	1		-	-	198.00	20.18	85.05	78.00	7.95	84.77	
2008-04-24	7	54.00	5.50	60.57	132.00	13.46	78.33	72.00	7.34	84.16	
2008-05-22	35	31.00	3.16	58.23	48.00	4.89	69.76	72.00	7.34	84.16	
2012-09-24	1621	33.00	3.36	58.43	22.00	2.24	67.11	0.00	0.00	76.82	
2013-02-19	1769	35.00	3.57	58.64	23.00	2.34	67.21	1.00	0.10	76.92	
2013-04-04	1813	36.00	3.67	58.74	25.00	2.55	67.42	69.00	7.03	83.85	Lecture prise par François Tremblay poste 94077
2013-05-29	1868	33.00	3.36	58.43	21.00	2.14	67.01	68.00	6.93	83.75	Lecture prise par François Tremblay poste 94077
2013-07-10	1910	35.00	3.57	58.64	23.00	2.34	67.21	70.00	7.14	83.96	lecture prise par Gabriel Genois
2013-11-25	2048	33.00	3.36	58.43	21.00	2.14	67.01	68.00	6.93	83.75	Lecture prise par François Tremblay poste 94077

### Annexe B2 - 1 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage F1 (provenance MTMDET)

ENDROIT: DOSSIER:	Notre-Dame-des-Neiges 0020-08-100(017)07A							
	Forage No.: Type et No. : Date d'installation: Profondeur dans le sol: Longueur totale: Élévation du T.N.: Élévation de la pointe: Élévation du dessus: Cste d'étalonnage: Correction d'inertie;	ÉI.	F-2 petur6017 2008-04-10 7.00 N/A 60.81 53.81 N/A 1.00 0.00			F-2 petur6089 2008-04-23 15.30 N/A 60.81 45.51 N/A 1.00 0.00		Remarques
Date de lecture	Nombre de jours	Lecture (kPa)	hw (m)	Él. (m)	Lecture (kPa)	hw (m)	Él. (m)	
2008-04-10	0	44.00	4.49	58.30		-	- 1	Lecture prise par Francois Tremblay
2008-04-11	1	39.00	3.98	57.79		-	-	poste 9811
2008-04-23	13	37.00	3.77	57.58		-	-	
2008-04-24	14	37.00	3.77	57.58	155.00	15.80	61.31	
2008-05-22	42	32.00	3.26	57.07	18.00	1.83	47.34	
2012-10-10	1644	36.00	3.67	57.48	15.00	1.53	47.04	
2013-02-19	1776	34.00	3.47	57.28	14.00	1.43	46.94	
2013-04-04	1820	35.00	3.57	57.38	16.00	1.63	47.14	Lecture prise par François Tremblay poste 94077
2013-05-29	1875	30.00	3.06	56.87	12.00	1.22	46.73	Lecture prise par François Tremblay poste 94077
2013-07-10	1917	32.00	3.26	57.07	14.00	1.43	46.94	Lecture prise par Gabriel Genois
2013-11-25	2055	30.00	3.06	56.87	12.00	1.22	46.73	Lecture prise par François Tremblay poste 94077
2014-03-31	2181	31.00	3.16	56.97	15.00	1.53	47.04	Lecture prise par François Tremblay poste 94077

### Annexe B2 - 2 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage F2 (provenance MTMDET)

Annexe B2 - 3 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage C1-2 (provenance MTMDET)

ENDROIT: DOSSIER:	Notre-Dames 0020-08-100	s-des-Nei (017)07 <i>A</i>	iges \-12											
	Forage No.:		C1-2			C1-2			C1-2			C1-2		
Г Г	Гуре et No. :	T.N.	petur8054			petur11503	3		petur11530			petur4128		
Date of	d'installation:	<u>_</u>	2012-10-03			2012-10-03	3		2012-10-03			2012-10-03		
Profondeu	r dans le sol:	EI.	46.00			32.00			15.00			6.00		
Lon	gueur totale:		N/ A			N/A			N/A			N/A		
Élévat	tion du T.N.:		81.16			81.16	<u>_</u>		81.16			81.16		
Élévation	de la pointe:	hw 📑	35.16			49.16			66.16	]		75.16		Remarques
Élévatior	n du dessus:		N/A		<u>{</u>	<u>N/ A</u>	_		<u>N/A</u>	]		N/A		
Cste d	l'étalonnage:		1.00			1.00			1.00			1.00		
Correct	tion d'inertie:		0.00		أستنشق	0.00	<u>_</u>	لتستنشئ	1.00	1	للسنسني	0.00		
Date de	Nombre de	Lecture			Lecture			Lecture			Lecture			
lecture	jours	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	(kPa)	hw (m)	Él. (m)	
2012-10-04	1	277.00	28.24	63.40	211.00	21.51	70.67		-			-	-	
2012-10-10	7	305.00	31.09	66.25	222.00	22.63	71.79	123.00	12.44	78.60	49.00	4.99	80.15	
2013-02-19	139	78.00	7.95	43.11	0.00	0.00	49.16	9.00	0.82	66.98	32.00	3.26	78.42	
2013-04-04	183	63.00	6.42	41.58	22.00	2.24	51.40	16.00	1.53	67.69	32.00	3.26	78.42	Lecture par François Tremblay poste 94077
2013-05-29	238	115.00	11.72	46.88	34.00	3.47	52.63	8.00	0.71	66.87	0.00	0.00	75.16	Lecture par François Tremblay poste 94077
2013-07-10	280	111.00	11.31	46.47	26.00	2.65	51.81	7.00	0.61	66.77	0.00	0.00	75.16	Lecture par Gabriel Genois
2013-11-25	418	90.00	9.17	44.33		-		5.00	0.41	66.57	0.00	0.00	75.16	Lecture par François Tremblay poste 94077
2014-03-31	544	57.00	5.81	40.97	31.00	3.16	52.32	6.00	0.51	66.67	0.00	0.00	75.16	Lecture par François Tremblay poste 94077

	Forage No.:		FZ-05	T.N.
	Code et No. :			
	Date d'installation:		2014-07-07	E.
	Profondeur dans le sol:		40.50	
	Longueur totale:		40.50	
	Élévation du T.N.:		86.64	hw
	Élévation de la pointe:		46.14	
	Élévation du dessus:		N/A	
	Cste d'étalonnage:		1.00	
	Correction d'inertie:		0.00	¥.U
Date de lecture	Nombre de jours	Lecture (kPa)	hw (m)	Él. (m)
2014-07-07	0			
2014-09-10	65	208.57	21.26	67.40
2014-11-28	144	210.92	21.50	67.64
2015-05-13	310	223.87	22.82	68.96

#### Annexe B2 - 4 : Lectures de pressions interstitielles pour le forage FZ-05 (provenance MTMDET)



Annexe B2 - 5 : Schéma d'installation du piézomètre dans FZ-05 (40,50 m de profondeur)

### Annexe B3 : Essais au piézocône

Annexe B3 - 1 : Sondage au piézocône CPTu1 – F1 (provenance MTMDET – campagne 2008)	
Annexe B3 - 2 : Sondage au piézocône CPTu2 - F2 (provenance MTMDET - campagne 2008)	
Annexe B3 - 3 : Sondage au piézocône sismique CM-04 - Notre-Dame-des-Neiges (provenance l	NTMDET
- campagne 2014)	
Annexe B3 - 4 : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-04 - Notre-Dame-des-Neig	ges
(provenance LVM)	
Annexe B3 - 5 : Sondage au piézocône sismique CM-05 - Notre-Dame-des-Neiges (provenance I	NTMDET
- campagne 2012-2013 (Qualitas))	



Annexe B3 - 1 : Sondage au piézocône CPTu1 – F1 (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B3 - 2 : Sondage au piézocône CPTu2 – F2 (provenance MTMDET – campagne 2008)



Fichiers: UliGeotec80/Style/LogM7Q\_Fiezocone.sty

Annexe B3 - 3 : Sondage au piézocône sismique CM-04 – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2014)



#### COMPTE RENDU D'ESSAI AU PIÉZOCÔNE

Nº DE L'ESSAI: Scory

SITUATION			
Site :	Tesis Pistole	Chargé de projet :	Mia
N° projet :	Poce 1980 0 100 - 100-01	Opérateur :	586
Client :	LITO	Nom du fichier :	\$32(032)12 - 5c-04
Date :	2014.7.04	Coordonnées Gps :	

CARACTÉRISTIQUES DE L'APPAREIL ET DE L'ESSAI					
Sonde utilisée :	DDG 1275 DDG 1221 Autre :	Liquide de saturation : - Sonde - Pierre poreuse	Glycérine Silicone Glycérine Silicone		
Type de réduction de friction :	🖙 Seigne 🗆 Croix	Réducteur de friction (D mm) :	48 68 43 Autre :		
Diamètre des tiges (mm) :	35,7 43,7	Distance Réducteur / Pointe			
Dispositif de fonçage :	bati #1	Vitesse de fonçage (cm/min.) :	60 (MTQ) 120		

	CONSTANTES D'ÉTALON	NAGE ET CAPACITÉ	DE LA SONDE	
Date d'étalonnage :	MA: 2014	Étalonné par :	VERTEK	
Capacité des capteurs :	qc		fs	U2
	0 100 MPa 0 44.5	MPa 130	0 KPa	3447.5 KPa

	STRATIGRAPHIE DE L'AVANT TROU
Parallèle au forage	
Profondeur estimée de la nappe :	
	PROFIL DE Vs
Distance de la poutre au forage :	1.02
Détails de l'installation :	sur sa originizion, Pierre pour supporter le bern.
Qualité du contact au sol :	Mayer

CONSTANTES D'ÉTALONNAGE ET CAPACITÉ DE LA SONDE						
	qc	fs	u <sub>2</sub>	Heure	T (°C)	Remarque
Avant zérottage (eau)	- 55	-2.1	12.8			
Initial (eau)	0	0	0	7.30	7.7	
Finale (vide)	42	-37	-2.6			
Final (eau)	32	-2.8	-198	11630	8.1	

S1Servicen072tGestechniquel/Nezoconstitutioni-Formulaise/CR-Eseal-Plazocone2.doc Page 1

Page 1 de 2

Annexe B3 - 4 : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-04 – Notre-Dame-des-Neiges (provenance LVM)



Annexe B3 - 4 (suite) : Compte rendu du sondage au piézocône sismique CM-04 – Notre-Dame-des-Neiges (provenance LVM)



Fichiers: U:\Geotec80\Style\LogMTQ\_Piezocone\_Vs.sty

Annexe B3 - 5 : Sondage au piézocône sismique CM-05 – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2012-2013 (Qualitas))

### Annexe B4 : Essais oedométriques

Annexe B4 - 1 : Essai oedométrique F1 – PS5 29,25m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET –	
campagne 2008)	291
Annexe B4 - 2 : Essai oedométrique F1 – PS6 32,25m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET –	
campagne 2008)	292
Annexe B4 - 3 : Essai oedométrique F1 – PS7 36,35m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET –	
campagne 2008)	293
Annexe B4 - 4 : Essai oedométrique F2 – PS1 6,30m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – car	mpagne
2008)	294
Annexe B4 - 5 : Essai oedométrique F2 – PS4 15,30m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET –	
campagne 2008)	295
Annexe B4 - 6 : Essai oedométrique C1-1 PS2 31,25m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET –	
campagne 2012-2013)	296
Annexe B4 - 7 : Essai oedométrique CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 72,86m)	297
Annexe B4 - 8 : Essai oedométrique CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	297
Annexe B4 - 9 : Essai oedométrique S2-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 72,66m)	298
Annexe B4 - 10 : Essai oedométrique S2-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	298
Annexe B4 - 11 : Essai oedométrique CR5-B – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 69,74m)	299
Annexe B4 - 12 : Essai oedométrique CR5-B – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	299
Annexe B4 - 13 : Essai oedométrique S3-TM2 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 69,65m)	300
Annexe B4 - 14 : Essai oedométrique S3-TM2 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	300
Annexe B4 - 15 : Essai oedométrique S1-TM3 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 68,29m)	301
Annexe B4 - 16 : Essai oedométrique S1-TM3 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	301
Annexe B4 - 17 : Essai oedométrique S2-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 65,28m)	302
Annexe B4 - 18 : Essai oedométrique S2-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	302
Annexe B4 - 19 : Essai oedométrique CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 65,20m)	303
Annexe B4 - 20 : Essai oedométrique CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	303
Annexe B4 - 21 : Essai oedométrique CR10-B – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 63,83m)	304
Annexe B4 - 22 : Essai oedométrique CR10-B – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire	304
Annexe B4 - 23 : Essai oedométrique CR11-A - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 62,20m)	305
Annexe B4 - 24 : Essai oedométrique CR11-A - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire	305
Annexe B4 - 25 : Essai oedométrique CR13-A - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 59,64m)	306
Annexe B4 - 26 : Essai oedométrique CR13-A - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire	306
Annexe B4 - 27 : Essai oedométrique S1-TM6 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 59,27m)	307
Annexe B4 - 28 : Essai oedométrique S1-TM6 - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire	307



Annexe B4 - 1 : Essai oedométrique F1 – PS5 29,25m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B4 - 2 : Essai oedométrique F1 – PS6 32,25m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B4 - 3 : Essai oedométrique F1 – PS7 36,35m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B4 - 4 : Essai oedométrique F2 – PS1 6,30m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)

Rapport no: AT-015-2008

Tube no: 3027



Annexe B4 - 5 : Essai oedométrique F2 – PS4 15,30m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B4 - 6 : Essai oedométrique C1-1 PS2 31,25m – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2012-2013)



Annexe B4 - 7 : Essai oedométrique CR1-B - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 72,86m)



Annexe B4 - 8 : Essai oedométrique CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire



Annexe B4 - 9 : Essai oedométrique S2-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 72,66m)



Annexe B4 - 10 : Essai oedométrique S2-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire 298



Annexe B4 - 11 : Essai oedométrique CR5-B - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 69,74m)



Annexe B4 - 12 : Essai oedométrique CR5-B - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire



Annexe B4 - 13 : Essai oedométrique S3-TM2 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 69,65m)



Annexe B4 - 14 : Essai oedométrique S3-TM2 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire



Annexe B4 - 15 : Essai oedométrique S1-TM3 - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 68,29m)



Annexe B4 - 16 : Essai oedométrique S1-TM3 – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire



Annexe B4 - 17 : Essai oedométrique S2-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 65,28m)



Annexe B4 - 18 : Essai oedométrique S2-TM4 - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire



Annexe B4 - 19 : Essai oedométrique CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges (élévation 65,20m)



Annexe B4 - 20 : Essai oedométrique CR8-A - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire



Annexe B4 - 21 : Essai oedométrique CR10-B - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 63,83m)



Annexe B4 - 22 : Essai oedométrique CR10-B – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire



Annexe B4 - 23 : Essai oedométrique CR11-A - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 62,20m)



Annexe B4 - 24 : Essai oedométrique CR11-A – Notre-Dame-des-Neiges – représentation linéaire



Annexe B4 - 25 : Essai oedométrique CR13-A - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 59,64m)



Annexe B4 - 26 : Essai oedométrique CR13-A - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire



Annexe B4 - 27 : Essai oedométrique S1-TM6 - Notre-Dame-des-Neiges (élévation 59,27m)



Annexe B4 - 28 : Essai oedométrique S1-TM6 - Notre-Dame-des-Neiges - représentation linéaire
## Annexe B5 : Essais triaxiaux

Annexe B5 - 1 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-19 400 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)	310
Annexe B5 - 2 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-20 150 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)	311
Annexe B5 - 3 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-20 300 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)	312
Annexe B5 - 4 : Cheminement de contraintes (Lambe) – F8 - TM19 et TM-20 (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Ne (provenance MTMDET).	iges 313
Annexe B5 - 5 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-28 200 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)	314
Annexe B5 - 6 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-28 300 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)	315
Annexe B5 - 7 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-28 400 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)	316
Annexe B5 - 8 : Cheminement de contraintes (Lambe) – F8 - TM28 (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET).	
Annexe B5 - 9 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai tria CIU – S1-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges	xial 318
Annexe B5 - 10 : Cheminement de contraintes (Lambe) – S1-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges Annexe B5 - 11 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai tri CIU – CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges	318 iaxial 319
Annexe B5 - 12 : Cheminement de contraintes (Lambe) – CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges Annexe B5 - 13 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai tri CIU – CR4-A – Notre-Dame-des-Neiges	319 iaxial 320
Annexe B5 - 14 : Cheminement de contraintes (Lambe) – CR4-A – Notre-Dame-des-Neiges Annexe B5 - 15 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai tri CIU – CR6-B – Notre-Dame-des-Neiges	320 iaxial 321
Annexe B5 - 16 : Cheminement de contraintes (Lambe) – CR6-B – Notre-Dame-des-Neiges Annexe B5 - 17 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai tri CIU – S1-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges	321 iaxial 322
Annexe B5 - 18 : Cheminement de contraintes (Lambe) – S1-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges Annexe B5 - 19 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai tri CIU – CR13-B – Notre-Dame-des-Neiges	322 iaxial 323
Annexe B5 - 20 : Cheminement de contraintes (Lambe) – CR13-B – Notre-Dame-des-Neiges	323

Annexe B5 - 21 : Comportement contrainte - déformation et variation de la pression interstitielle durant l'é	essai triaxial
CIU – S2-TM6 – Notre-Dame-des-Neiges	324
Annexe B5 - 22 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S2-TM6 - Notre-Dame-des-Neiges	324

Les corrections apportées aux données des essais triaxiaux CIU sont pour la surface et pour la membrane.



Annexe B5 - 1 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-19 400 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 2 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-20 150 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 3 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-20 300 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 4 : Cheminement de contraintes (Lambe) – F8 - TM19 et TM-20 (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 5 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-28 200 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 6 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-28 300 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 7 : Comportement contrainte – déformation (contrainte déviatorique) et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – TM-28 400 kPa (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 8 : Cheminement de contraintes (Lambe) – F8 - TM28 (Inspec-sol) – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET)



Annexe B5 - 9 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S1-TM1 – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 10 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S1-TM1 - Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 11 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – CR1-B – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 12 : Cheminement de contraintes (Lambe) - CR1-B - Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 13 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – CR4-A – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 14 : Cheminement de contraintes (Lambe) - CR4-A - Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 15 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – CR6-B – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 16 : Cheminement de contraintes (Lambe) – CR6-B – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 17 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S1-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 18 : Cheminement de contraintes (Lambe) – S1-TM4 – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 19 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – CR13-B – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 20 : Cheminement de contraintes (Lambe) - CR13-B - Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 21 : Comportement contrainte – déformation et variation de la pression interstitielle durant l'essai triaxial CIU – S2-TM6 – Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B5 - 22 : Cheminement de contraintes (Lambe) - S2-TM6 - Notre-Dame-des-Neiges

# Annexe B6 : Caractérisation physico-chimique

Annexe B6 - 1 : Tableau des résultats de salinité	326
Annexe B6 - 2 : Abaque de salinité et résultats de l'essai de salinité - Notre-Dame-des-Neiges	326
Annexe B6 - 3 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F1 de	
Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)	327
Annexe B6 - 4 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F2 de	
Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)	328
Annexe B6 - 5 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage C1-1 de	е
Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2012)	329
Annexe B6 - 6 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage C1-2 de	е
Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2012)	330
Annexe B6 - 7 : Résultats des trois essais de sédimentométrie effectués sur des échantillons de la	
campagne 2015 du site de Notre-Dame-des-Neiges	331
Annexe B6 - 8 : Tableau des teneurs en eau et des limites d'Atterberg déterminées durant les différents	
essais de laboratoire - Notre-Dame-des-Neiges	332
Annexe B6 - 9 : Résultats des essais de perméabilité pour le site de Notre-Dame-des-Neiges	333
Annexe B6 - 10 : Essai de perméabilité à charge constante – S2-TM1	333
Annexe B6 - 11 : Essai de perméabilité à charge variable – S1-TM3	334
Annexe B6 - 12 : Essai de perméabilité à charge variable – CR10-B	335
Annexe B6 - 13 : Essai de perméabilité à charge variable – S1-TM6	336

Annexe B6 - 1 : Tableau de	s résultats de salinité
----------------------------	-------------------------

Site de Notre-Dame-des-Neiges							
Échantillons	Élévation moyenne (m)	Conductivité électrique (mS)	Concentration (g/l)				
S2-TM1	72.60	Supérieure	2.8	1.5			
CR10-A	63.95	Intermédiaire	2.7	1.5			
S1-TM6	59.20	Inférieure	5.3	3.8			



Annexe B6 - 2 : Abaque de salinité et résultats de l'essai de salinité - Notre-Dame-des-Neiges

Québec

2014-01-30T12:40:02

#### Dossier : 0020-08-100(017)07A

### Sondages : 0020-08-100(017)07A F1 (8)



Nombre de dossiers = 1 ; Nombre de sondages = 1; Nombre d'analyses granulométriques = 8

Annexe B6 - 3 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F1 de Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008) Transports Québec 2014-01-30T12:40:27

#### Dossier: 0020-08-100(017)07A

## Sondages : 0020-08-100(017)07A F2 (6)



Nombre de dossiers = 1 ; Nombre de sondages = 1; Nombre d'analyses granulométriques = 6

Annexe B6 - 4 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage F2 de Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)

Québec

2014-01-31T10:08:38

### Dossier : 0020-08-100(17)07A12

#### Sondages : 0020-08-100(17)07A12 C1-1 (12)



Nombre de dossiers = 1 ; Nombre de sondages = 1; Nombre d'analyses granulométriques = 12

Annexe B6 - 5 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage C1-1 de Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2012)



2014-01-31T10:14:32

#### Dossier : 0020-08-100(17)07A12

### Sondages : 0020-08-100(17)07A12 C1-2 (8)



Nombre de dossiers = 1 ; Nombre de sondages = 1; Nombre d'analyses granulométriques = 8

Annexe B6 - 6 : Résultats des essais de sédimentométrie effectués sur les échantillons du forage C1-2 de Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2012)



Annexe B6 - 7 : Résultats des trois essais de sédimentométrie effectués sur des échantillons de la campagne 2015 du site de Notre-Dame-des-Neiges

Échantillana	Élévation	Profondeur	Tuna d'áchantillan			Limites d	Atterberg		
Echantinons	(m)	(m)	Type d echantilion	i ype u essai	(%)	w <sub>P</sub>	wL	IP	۱L
CR1-B	72.81	13.83	carotte	oedo <sub>moy</sub>	19.8	18.9	36.3	17.5	0.1
CR1-B (suite)	72.71	13.93	carotte	triax <sub>moy</sub>	17.6				
TM1	72.71	13.93	tube	tube <sub>moy</sub>	22.8				
S1-TM1	72.70	13.94	tube	triax <sub>moy</sub>	21.6				
S2-TM1	72.60	14.04	tube	oedo <sub>moy</sub>	22.5	20.3	44.3	23.9	0.1
CR4-A	70.55	16.09	carotte	triax <sub>moy</sub>	21.8				
TM2	69.70	16.94	tube	tube <sub>moy</sub>	21.4	20.9	42.7	21.9	0.0
CR5-B	69.67	16.97	carotte	oedo <sub>moy</sub>	17.7	18.0	29.4	11.4	0.0
S3-TM2	69.60	17.04	tube	oedo <sub>moy</sub>	20.4	23.6	40.6	16.9	0.0
CR6-B	68.85	17.79	carotte	triax <sub>moy</sub>	20.7				
TM3	68.32	18.32	tube	tube <sub>moy</sub>	17.7				
S1-TM4	65.33	21.31	tube	triax <sub>moy</sub>	19.4				
TM4	65.29	21.35	tube	tube <sub>moy</sub>	17.7				
S2-TM4	65.22	21.42	tube	oedo <sub>moy</sub>	17.4	17.8	27.1	9.3	0.0
CR8-A	65.14	21.50	carotte	oedo <sub>moy</sub>	15.9	17.2	24.3	7.1	0.0
TM5	64.98	21.66	tube	tube <sub>moy</sub>	15.8				
CR11-A	62.14	24.50	carotte	oedo <sub>moy</sub>	17.6	17.5	22.9	5.4	0.0
CR13-A	59.57	27.07	carotte	oedo <sub>moy</sub>	20.5	17.8	23.7	5.9	0.4
CR13-B	59.44	27.20	carotte	triax <sub>moy</sub>	22.5				
S1-TM6	59.19	27.45	tube	oedo <sub>moy</sub>	20.1	17.9	26.0	8.1	0.3
TM6	59.01	27.63	tube	tube <sub>moy</sub>	18.8				
S2-TM6	58.99	27.65	tube	triax <sub>moy</sub>	19.1				

Annexe B6 - 8 : Tableau des teneurs en eau et des limites d'Atterberg déterminées durant les différents essais de laboratoire – Notre-Dame-des-Neiges

Site	Échantillon	Élévation (m)	Unité	Perméabilité (k <sub>o</sub> ) (m/s)	e <sub>o</sub>	C <sub>k</sub>	Relation c <sub>k</sub> - e <sub>0</sub>	Type d'essai
	S2-TM1	72.66 à 72.54	supérieure	1.40E-09	0.61	0.30	c <sub>k</sub> =0.5*e <sub>0</sub>	charge constante
Notre-Dame-des-	Dame-des- S1-TM3 68.32 à 68.2	68.32 à 68.26		8.50E-10	0.55	0.18	$c_k = 0.32 * e_0$	charge variable
Neiges	CR10-B	63.87 à 63.79	intermédiaire	1.47E-10	0.50	0.41	c <sub>k</sub> =0.83*e <sub>0</sub>	charge variable
	S1-TM6	59.18 à 59.12	inférieure	2.37E-10	0.56	0.46	$c_k = 0.8 * e_0$	charge variable

Annexe B6 - 9 : Résultats des essais de perméabilité pour le site de Notre-Dame-des-Neiges



Annexe B6 - 10 : Essai de perméabilité à charge constante – S2-TM1



Annexe B6 - 11 : Essai de perméabilité à charge variable - S1-TM3



Annexe B6 - 12 : Essai de perméabilité à charge variable - CR10-B



Annexe B6 - 13 : Essai de perméabilité à charge variable - S1-TM6

# Annexe B7 : Caractérisation minéralogique

nnexe B7 - 1 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges unité intermédiaire/supérieure)
nnexe B7 - 2 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges (unité
itermédiaire/supérieure)
unité inférieure)
nnexe B7 - 4 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – CR13-A – Notre-Dame-des-Neiges (unité Iférieure)
nnexe B7 - 5 : Tableau des résultats de l'essai de surface spécifique totale
nnexe B7 - 6 : Détermination de la quantité de bleu de méthylène par spectrophotomètre UV pour l'obtention de la urface spécifique – Notre-Dame-des-Neiges
nnexe B7 - 7 : Tableau des résultats pour la capacité d'échange cationique (CEC) – Notre-Dame-des-Neiges343
nnexe B7 - 8 : Tableau des résultats pour l'essai thermogravimétrique (sans traitement à l'acide chlorhydrique)343 nnexe B7 - 9 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique – CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges 343 nnexe B7 - 10 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique – CR13-A – Notre-Dame-des-Neiges
nnexe B7 - 11 : Tableau des calculs pour l'obtention du % en calcite, dolomite et carbonate total par la méthode hittick



Universite Laval, Quebec. - Thu May 28 2015 @12:00pm





Universite Laval, Quebec. - Mon Jun 01 2015 @2:51pm

Annexe B7 - 2 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges (unité intermédiaire/supérieure)



Universite Laval, Quebec. - Wed Jun 10 2015 @3:08pm

Annexe B7 - 3 : Diffraction des rayons X – analyse minéralogique sur poudre – CR13-A – Notre-Dame-des-Neiges (unité inférieure)



Universite Laval, Quebec. - Mon Jun 01 2015 @2:59pm

Annexe B7 - 4 : Diffraction des rayons X – analyse des minéraux argileux – CR13-A – Notre-Dame-des-Neiges (unité inférieure)

Fiole	Échantillon	Site d'étude	Élévation	Surface spécifique
			m	m²/g
G283	CR8-A	Notre-Dame-des-Neiges	65.14	20
G454	CR13-A	Notre-Dame-des-Neiges	59.58	27

Annexe B7 - 5 : Tableau des résultats de l'essai de surface spécifique totale



Annexe B7 - 6 : Détermination de la quantité de bleu de méthylène par spectrophotomètre UV pour l'obtention de la surface spécifique – Notre-Dame-des-Neiges

Annexe B7 - 7 : Tableau des résultats pour la capacité d'échange cationique (CEC) – Notre-Dame-des-Neiges

Sito d'átudo	Échantillon	CEC	
Sile d'elude	Echanunon	meq/100g	
Notre-Dame-des-Neiges	CR8-A	4.3 ± 0.3	
Notre-Dame-des-Neiges	CR13-A	6.0 ± 0.4	

Annexe B7 - 8 : Tableau des résultats pour l'essai thermogravimétrique (sans traitement à l'acide chlorhydrique)

Échantillons	Poids <sub>initial</sub> (mg)	Poids <sub>500℃</sub> (mg)	Poids <sub>700°C</sub> (mg)	Poids <sub>500-700°C</sub> (mg)	Carbonates (%)
CR8-A	39.8±0.1	38.6±0.1	37.4±0.1	$1.2 \pm 0.2$	7.0±0.2
CR13-A	39.3±0.1	$36.9 \pm 0.1$	$35.6 \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.2$	7.9 ± 0.2



Annexe B7 - 9 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique – CR8-A – Notre-Dame-des-Neiges


Annexe B7 - 10 : Courbe de perte de masse par analyse thermogravimétrique - CR13-A - Notre-Dame-des-Neiges

Date	Échantillan	Masse échantillon	Température	Pression atmos	Volume	fac	fac	volume	%calcite 1.7g	%calcite
	Echantilion	(g)	(°C)	(mmHg)	après 30sec (cm <sup>3</sup> )	température	vol gaz	gaz (cm³)	pour 1.7g	
08-sept-15	CR8-A	1.712	23	751.6	38	0.5	1.0314	17.82	4.2	4.2
	CR13-A	1.805	23	751.6	35	0.5	1.0314	14.85	3.5	3.3

#### Annexe B7 - 11 : Tableau des calculs pour l'obtention du % en calcite, dolomite et carbonate total par la méthode Chittick

Annexe B7 - 11 (suite) : Tableau des calculs pour l'obtention du % en calcite, dolomite et carbonate total par la méthode Chittick

Date	Échantillan	Température	Pression atmos	Volume	fac	volume	%dolomite	0/ dolomito	%Ca total
	Echantilion	(°C)	(mmHg)	après 30min (cm <sup>3</sup> )	vol gaz	gaz (cm <sup>3</sup> )	pour 1.7g	%dolomite	
08-sept-15	CR8-A	23	751.6	53	1.0314	15.50	4.0	4.0	8.1 ± 0.3
	CR13-A	23	751.6	48	1.0314	13.40	3.4	3.2	6.5 ± 0.3

### Annexe B8 : Profils géotechniques par sondages

.347
.348
- .349
– .350



Annexe B8 - 1 : Profil géotechnique – F1 et CPTu1 – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B8 - 2 : Profil géotechnique – F2 et CPTu2 – Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe B8 - 3 : Profil géotechnique - C1-1 et CM-05 - Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET - campagne 2012-2013)



Annexe B8 - 4 : Profil géotechnique - C1-2 et CM-05 - Notre-Dame-des-Neiges (provenance MTMDET - campagne 2012-2013)

# Annexe C Trois-Pistoles

### Annexe C : Trois-Pistoles

Annexe C - 1 : Site de Trois-Pistoles (vue d'ensemble)	353
Annexe C - 2 : Site de Trois-Pistoles – Secteur C62006b-C62007b	354
Annexe C - 3 : Sondage au piézocône C62006b – Inspec-sol – Trois-Pistoles (provenance MTMDET –	
campagne 2008)	355
Annexe C - 4 : Sondage au piézocône C62007b – Inspec-sol – Trois-Pistoles (provenance MTMDET –	
campagne 2008)	356



Système de coordonnées: Lat/Long, Degrés -180 ==> +180 Datum: NAD 83 Échelle 1:100 000

Carte réalisée par: Kevin Hébert LIDAR 2013 - Provenance MTMDET





Système de coordonnées: Lat/Long, Degrés -180 ==> +180 Datum: NAD 83 Échelle 1:20 000

Carte réalisée par: Kevin Hébert LiDAR 2013 - Provenance MTMDET

Annexe C - 2 : Site de Trois-Pistoles – Secteur C62006b-C62007b



Annexe C - 3 : Sondage au piézocône C62006b – Inspec-sol – Trois-Pistoles (provenance MTMDET – campagne 2008)



Annexe C - 4 : Sondage au piézocône C62007b – Inspec-sol – Trois-Pistoles (provenance MTMDET – campagne 2008)

## Annexe D

# Géologie des dépôts argileux

### Annexe D : Géologie des dépôts argileux

Annexe D - 1 : Rapport de sondage G-41 - Pont de Rivière-du-Loup (provenance MTMDET)	
Annexe D - 2 : Rapport de sondage F8 – Ladrière (provenance MTMDET)	
Annexe D - 3 : Rapport de sondage F1 – Le Bic (provenance MTMDET)	
Annexe D - 4 : Profil au pénétromètre statique au pourtour du glissement de Rimouski de 1951	(provenance
MTMDET)	
Annexe D - 5 : Profil de piézocône réalisé en F4 – St-Anaclet (provenance MTMDET)	
Annexe D - 6 : Profil des propriétés géotechniques à partir du forage F4 à St-Anaclet (provenai	nce
MTMDET)	
Annexe D - 7 : Rapport de sondage 30 - St-René-de-Matane (provenance MTMDET)	
Annexe D - 8 : Rapport de sondage 1 – Petite-Matane (provenance MTMDET)	

Cette annexe contient quelques exemples de forages, de profils au piézocône ainsi que de profils géotechniques de sites se situant dans la grande région du Bas-Saint-Laurent et qui permettent d'obtenir un portrait partiel de la distribution de l'anomalie stratigraphique. Chacune des figures est brièvement discutée.





L'analyse du profil G-41 à Rivière-du-Loup montre que le sol est constitué d'argile de consistance molle avec des valeurs de résistance au cisaillement non drainé entre 12 et 28 kPa. L'indice de liquidité augmente avec la profondeur. Il y a présence d'une croûte argileuse d'une épaisseur approximative de 2,50 m. L'élévation du terrain naturel est de 94,56 m et l'unité d'argile débute à l'élévation 92,95 m.





L'analyse du profil F8 à Ladrière montre que le sol est constitué d'argile normalement consolidée, surmontée par 5 m de sol organique. Des valeurs de résistance au cisaillement non drainé entre 6 et 25 kPa ont été mesurées dans le dépôt de silt et argile. Les valeurs de l<sub>L</sub> plus élevées que 1 indiquent que le sol a pu subir un lessivage. Bien que l'élévation soit inconnue, il est possible de la déduire approximativement à partir des courbes de niveau (BNDT). L'élévation du terrain naturel se situerait autour de 140 à 145 m.





Le rapport de forage F1 au Bic présente quelques caractéristiques semblables à ce qui se retrouve dans la région de l'Isle-Verte – Trois-Pistoles. En effet, l'unité de silt et argile sableux de 3,40 m d'épaisseur possède une résistance au cisaillement non drainé assez élevée, et des teneurs en eau très faible, près de la limite de plasticité. L'unité sous-jacente est une argile et silt avec des valeurs d'indice N de 18 à 29. Ce secteur est néanmoins considéré comme incertain étant donné le manque d'information. L'élévation du terrain naturel est de 22,29 m tandis que le début de la couche de silt et argile est à une élévation de 20,18 m.



Annexe D - 4 : Profil au pénétromètre statique au pourtour du glissement de Rimouski de 1951 (provenance MTMDET)

Ce profil au pénétromètre statique provient de données datant de 1976 récupérées au MTMDET. Quelques profils ont été réalisés au pourtour et à l'intérieur du glissement de terrain de Rimouski (1951) au bord de la rivière Rimouski. La portion supérieure serait constituée de sable fin (données MTMDET), mais la portion entre 11 et 16 m de profondeur pourrait correspondre à une unité d'argile et silt très raide (q<sub>c</sub> d'environ 7 MPa). Par la suite, il y a une diminution graduelle de la résistance qui est observée, suivie par un profil de résistance constant dans l'unité d'argile moins raide à une valeur de q<sub>c</sub> d'environ 1 MPa. Davantage de détails seraient nécessaires afin de s'assurer que cette région est également caractérisée par une anomalie semblable à la région de l'Isle-Verte – Trois-Pistoles.

Tout près de Rimouski se trouve le site de St-Anaclet, où des travaux dans le but de faire passer l'autoroute 20 au-dessus du chemin de fer du CN ont révélé une anomalie qui correspond probablement à celle retrouvée dans le secteur Isle-Verte – Trois-Pistoles. Ci-dessous se trouve le rapport de sondage F4 ainsi que le profil de piézocône et le profil des propriétés géotechniques associés. Le sondage F4, dans lequel un profil de scissomètre de chantier a été effectué montre qu'il y a présence d'une couche d'argile et silt très raide d'une épaisseur d'environ 5 à 7 m. Celle-ci surmonte une couche d'argile et silt moins raide sur environ 18 m, don la résistance au cisaillement non drainé moyenne est d'environ 35 kPa. De plus, le passage entre les deux unités est assez clairement marqué par la chute de résistance au cisaillement non drainé ainsi que par l'augmentation de la teneur en eau des échantillons plus en profondeur. Le profil de CPTu montre une grande ressemblance avec le profil du pénétromètre statique du glissement de Rimouski. Il s'agit du seul site où une caractérisation complète a été effectuée qui montre la présence de l'anomalie stratigraphique.



Annexe D - 5 : Profil de piézocône réalisé en F4 – St-Anaclet (provenance MTMDET)



Annexe D - 6 : Profil des propriétés géotechniques à partir du forage F4 à St-Anaclet (provenance MTMDET)

Les quelques forages disponibles dans la région de Matane montrent la présence de sols argileux de consistance très raide. Ce rapport de forage à St-René-de-Matane montre une unité d'argile et silt d'une épaisseur supérieure à 10 m dont les indices N varient entre 38 et 66. D'autres forages dans la région montrent des profils de résistance au cisaillement non drainé allant jusqu'à 176 kPa, sans toutefois démontré l'anomalie qui caractérise le secteur de l'Isle-Verte – Trois-Pistoles. Le terrain naturel au forage 30 se trouve à une élévation de 55,43 m, tandis que l'élévation au forage 1 est de 40,80 m.

Transport	ébec	3 63 3 63	RAPI	o	RT	DE	SON	DAC	GE			Page	1 de 1
Localisation	n générale	: St. René-de-Matane (	Dossier Forl	)		Dot	ssier: 19	5-01-120	(019)99		SONDAGE: 30	)	
Endroit:				Dat	e de dél	but du sor	ndage: 199	9-05-31		Prof. fi	n (type arrêt): 16	6.9 m	
TYPES DÉCHA CF: Cuillère PS: Piston s CR: Carottie TA: Tarière VR: Vrac II AU: Autre D	NTILLONNE e fendue stationnai er V: Indéten VE: Délayé	UR ÉTAT DES ÉCHANTILLONS re Intact Remanié Perdu miné Carotte Autre	ESSAU N: P X Suv: S X Srv: S K: P PI: P	énétr cisso cisso ermé ressio	ation sta mètre (k mètre (k abilité (r on limite	andard (Pa) (Pa) m/s) e (kPa)	E: Modu St: Sensi AG: Analy C: Cons t: Cisail Dr: Dens	le press bilité se Gran olidation lement ité relati	iométrique Iulométrique ( Internet de la construction Internet de la construction Inte	Pv: Poids v W: Teneur W: Pour ca WI: Limite c Wp:Limite c S : Niveau	rolumique en eau (%) alculer I <sub>L</sub> (%) de liquidité (%) de plasticité (%) d'eau (m)	Coordoo UTM NA 53 6 Élévation (géodésique	nées (m): .D27 (Zone:) 98150.00m (Y) 16300.00m (X) : 55.43m (Z)
Élev	Piézo-	COUPE GÉOLOG	IQUE					É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS		
Prof.(m)	métrie	Description	Str.	at	Prof.	Type-No	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem. sur	Essais	Su 40	80 120	160
55.43		Suaugraphique		ц,	(m)	Calibre	(%)	RQD	N/RQD	et notes	W 20	40 60	80
<b>2</b> 53 23 2.20 <b>4</b> <b>6</b> <b>48.73</b> 6.70 <b>8</b> <b>10</b>		Sable graveleux et silteu traces d'argile. Argile et silt, traces de sa et de gravier	x,		0.75 1.50 2.30 3.05 3.80 4.55 6.10 6.85 7.60 9.15 10.66 12.20 13.70	CF-82 CF-83 CF-84 CF-86 CF-87 CF-87 CF-89 CF-89 CF-90 CF-91 CF-91 CF-92 CF-92 CF-94	0/45 (0%) 8/45 (18%) 18/45 (40%) 32/45 (44%) 20/45 (44%) 5/45 (11%) 7/45 (10%) 37/45 (82%) 0/45 (0%) 27/45 (87%) 27/45 (60%) 33/45 (73%) 31/45	3 7 7 225 37 41 40 50 50 50 50 50 57 61 61 57 67		AG			
27.00 H				$\sim$	15.25	CF-96	25/25	R,		AG			
-16							(100%)						
38.53 16.90		Fin du forage			(16.75)	CF-97	13/15 (87%)	R					
Remarque	s: \Sols\N	o. Routes\0195-01-120(019	)98A\SRMAT	ANE.	788\S30	).wfs				Date des	s dernières mod	ifications:	

Annexe D - 7 : Rapport de sondage 30 - St-René-de-Matane (provenance MTMDET)

Transports Qué	bec 🔡	3	RAPP	0]	RT	DE S	SON	DA	GE			Page 1 d	le 1
Localisation	générale :	PETITE-MATANE (Do	ssier Forlog)			Dos	ssier: 965	73-02(	019)92		SONDAGE: 1		
Endroit:		-		Date	e de dél	out du sor	ndage: 199	2-11-10	0	Prof. fi	n (type arrêt): 13	im	
TYPES DÉCHAN CF: Cuillère f PS: Piston st CR:Carottier	NTILLONNEUR fendue tationnaire	ÉTAT DES ÉCHANTILLONS	ESSAIS N: Pé X Suv:Sci	nétra	ation sta mètre (k	ndard Pa)	E: Modu St. Sensi AG: Analy	le press bilité se Grar	siométrique nulométrique (	Pv: Poids v W: Teneur W: Pourca	olumique en eau (%) alculer I <sub>L</sub> (%)	Coordonné UTM NAD2	es (m): 7 (Zone:)
TA: Tarière VR: Vrac IN: AU: Autre DE	: Indétermin E: Délayé	é Perdu Carotte Autre	X Srv: Sci K: Per Pl: Pre	issor méa essio	mètre (k abilité (n n limite	Pa) n/s) (kPa)	C: Cons τ: Cisail Dr: Densi	olidatior lement ité relati	n – H	⊣ WI: Limite o - Wp:Limite o ≰ : Niveau	de liquidité (%) de plasticité (%) d'eau (m)	6153 Élévation: (géodésique)	00.00m (Y) 00.00m (X) 40.80m (Z)
<u> </u>	Piézo-	COUPE GÉOLOG	IQUE					É	CHANTILLO	NS ET ESS	AIS		
Prof.(m)	métrie	Description	Str.	at	Prof.	Type-No	Réc. (cm/cm)	N	N1/N2/N3/N4 Rem. sur	Essais	Su 40	80 120	160
40.80		stratigraphique		μ,	(m)	Calibre	(%)	RQD	N/RQD	et notes	W 20	40 60	80
0.00 2 38.00 2.80 4 6 8 8 10 10 12 12 14 9 25.80 15.00 16		REMBLAI ARGILE SILTEUSE										114 84 77 75 98 299 100 116	140 137 140 137 × 162 30
118													
Remarques:	Remarques: \Sols\Route code administratifi96573-02(019)92\MATANEW.427\S1.wfs Date des dernières modifications:												



# Annexe E

### Traitement des données de l'essai triaxial

### Annexe E : Traitement des données de l'essai triaxial

Annexe E - 1 : Caractéristiques géométriques de rupture des échantillons soumis à des essais triaxiaux	(La
Rochelle et al., 1988a)	.374
Annexe E - 2 : Relation entre le module d'extension et l'épaisseur de la membrane (La Rochelle et al.,	
1988a)	.374
,	

Durant l'essai de cisaillement, les paramètres enregistrés par le logiciel LabView en temps réel sont le temps (s), le déplacement vertical (mm), la charge (kN) et la pression interstitielle (kPa). Les pressions de confinement  $\sigma_3$  et  $\sigma_1$  sont connues et imposées par l'utilisateur. À partir de ces quelques données, il est alors possible de représenter l'essai de cisaillement de différentes manières, comme la représentation du cheminement de contraintes ou encore, de présenter la courbe contrainte-déformation. La déformation axiale se calcule à partir du changement de hauteur enregistré par le capteur LVDT. La contrainte de confinement  $\sigma_3$  demeure constante tout au long de l'essai, tandis que la contrainte  $\sigma_1$  augmente au fur et à mesure de l'essai, par l'augmentation de charge fournie par la presse hydraulique. Donc la contrainte  $\sigma_1$  est obtenue en divisant la charge par l'aire de l'échantillon. En connaissant en temps réel les pressions interstitielles se développant dans l'échantillon, il est alors possible de les soustraire aux contraintes de confinement pour obtenir les contraintes effectives  $\sigma'_3$  et  $\sigma'_1$ . L'utilisateur peut alors décider de travailler dans les représentations de Lambe (s' - t) ou Cambridge (p' - q). La représentation de Lambe est préconisée dans ce cas-ci.

Pour la représentation de Lambe, les deux paramètres sont calculés comme suit :

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$$
$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$$

Afin de tenir compte du changement d'aire de l'échantillon durant la consolidation et le cisaillement, une correction doit être apportée; une correction est aussi appliquée pour corriger la résistance de la membrane utilisée lors de l'essai. Ces deux corrections sont décrites ci-après.

#### Corrections des données

Les données obtenues suite au cisaillement doivent être corrigées pour tenir compte de deux facteurs, soit pour l'aire et pour la résistance de la membrane. Lors du cisaillement, il y a une modification de l'aire de l'échantillon par rapport à l'aire initiale. Ce changement d'aire doit être pris en compte pour le calcul des contraintes. De plus, l'effet de la membrane doit être pris en compte également, car celle-ci peut changer la résistance mesurée du sol. Les détails de ces corrections proviennent de l'article de La Rochelle et al. (1988a).

La correction d'aire à être apportée dépend du type de rupture lors du cisaillement. Il faut tout d'abord calculer certains paramètres avant d'obtenir l'aire corrigée. Premièrement, il faut obtenir la hauteur de l'échantillon après la consolidation, à partir de l'équation suivante :

$$H_c = H_0 \left( 1 - \frac{1}{3} \frac{\Delta V_c}{V_0} \right)$$

où :

H<sub>c</sub> = Hauteur de l'échantillon après la consolidation

H<sub>0</sub> = Hauteur initiale de l'échantillon

V<sub>0</sub> = Volume initial de l'échantillon

 $\Delta V_c$  = Changement de volume de l'échantillon pendant la consolidation.

Deuxièmement, il est alors possible de déterminer l'aire de l'échantillon après la consolidation à partir de l'équation suivante :

$$A_{c} = A_{0} \left( \frac{1 - \Delta V_{c} / V_{0}}{1 - \Delta V_{c} / 3 V_{0}} \right)$$

où :

A<sub>c</sub> = Aire de l'échantillon après la consolidation

A<sub>0</sub> = Aire de l'échantillon avant la consolidation.

Et troisièmement, la détermination de la hauteur, du volume et de la déformation axiale se détermine par les équations suivantes :

$$V = V_c - \Delta V$$
$$H = H_c - \Delta H$$
$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_c}$$

où :

 $\epsilon_1$  = Déformation axiale

Vc = Volume de l'échantillon après consolidation

V = Volume de l'échantillon

 $\Delta V$  = Changement de volume durant le cisaillement

H = Hauteur de l'échantillon

 $\Delta H$  = Changement de hauteur durant le cisaillement.

#### Correction pour l'aire

Il est maintenant possible de calculer l'aire corrigée de l'échantillon pendant le cisaillement, en fonction de son mode de rupture, en baril ou par plan de cisaillement unique.

Pour une rupture en baril, l'équation est la suivante :

$$A_{cor} = A_c \left( \frac{1 + \Delta V / V_c}{1 - \varepsilon_1} \right)$$

Comme il s'agit d'un essai en condition non drainée, la variation de volume est nulle et donc l'équation devient :

$$A_{cor} = A_c \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_1}\right)$$

Pour une rupture par plan de cisaillement, l'aire corrigée s'obtient par cette équation :

$$A_{cor} = \frac{\pi}{4} d_a d_b$$

où :

 $d_a$  = Grand diamètre de l'ellipse  $d_b$  = Petit diamètre de l'ellipse.

Ces diamètres, ainsi que l'angle α du plan de cisaillement, se mesurent au moment ou l'échantillon est démonté, juste avant de le placer dans l'étuve pour obtenir la teneur en eau finale. L'Annexe E - 1 présente les caractéristiques géométriques des échantillons.

Même lors d'une rupture de ce type, il y a un certain bombement de l'échantillon qui est observable avant la rupture par plan de cisaillement unique. Afin d'obtenir l'aire corrigée, il faut tout d'abord corriger l'aire de l'échantillon, et ce jusqu'au maximum de la contrainte déviatorique atteint. À partir de ce point, la correction d'aire s'effectue à partir de l'équation utilisant les diamètres de l'ellipse.

Dans le cas des argiles typiques de la mer de Champlain, la rupture par plan de cisaillement quasiparfait n'existe pas, car il y a toujours un gonflement qui est associé à la rupture. Dans ce cas, précis, l'aire doit être corrigée différement. Pour ce qui est des sols étudiés, aucun gonflement n'est visible et le plan de cisaillement est toujours bien défini lorsqu'il est présent.

#### Correction pour la membrane

Une correction pour la membrane utilisée doit être appliquée. La membrane utilisée lors des essais possède une épaisseur de 0,305 mm et un diamètre de 38,1 mm. Cette correction permet de réduire l'effet du confinement par cette membrane qui peut apporter une contrainte supplémentaire

sur l'échantillon. Deux différentes corrections doivent être prises en compte, soit : la correction de membrane pour la pression de confinement, et la correction de membrane en fonction du type de rupture (baril ou plan de cisaillement).

Pour ce qui est de la correction pour la pression de confinement, il s'agit de soustraire la pression directe qui est appliquée sur l'échantillon. Cette pression doit être ajoutée à la pression de confinement  $\sigma_3$ . La correction est fonction du diamètre de la membrane ainsi que de son module d'extension. L'Annexe E - 2 montre la relation entre le module d'extension et l'épaisseur de la membrane.

La pression de confinement exercée par la membrane est calculée à partir de l'équation suivante :

$$p_{om} = 2M_i \frac{d_0 - d_{im}}{d_0 * d_{im}}$$

où :

pom = Pression de confinement induite par la membrane

M<sub>i</sub> = Module sécant d'extension de la membrane (1% d'extension)

d<sub>0</sub> = Diamètre de l'échantillon à la fin de la consolidation

d<sub>im</sub> = Diamètre initial de la membrane.

Pour les essais effectués lors de cette étude, le diamètre de la membrane est de 38,1 mm, ce qui correspond au diamètre des échantillons utilisés. Comme les diamètres sont sensiblement les mêmes, cela fait en sorte que la pression de confinement appliquée par la membrane sur l'échantillon est pratiquement nulle et donc, celle-ci est négligée pour la correction.

Pour la correction selon le type de rupture en baril, il existe deux types d'équations, selon s'il y a flambage ou non de la membrane. Comme dans la présente étude, la pression de confinement appliquée est toujours relativement importante, il n'y a jamais de flambage de la membrane observée. Dans ce cas, la correction s'applique sur la contrainte  $\sigma_1$  selon l'équation :

$$\sigma_{\rm lm} = \left(\frac{\pi \, {\rm d}_0 \, M \varepsilon}{a_{\rm cor}}\right) / 1000$$

où :

 $\sigma_{1m}$  = Contrainte reprise par la membrane

d<sub>0</sub> = Diamètre de l'échantillon après la consolidation

M = Module d'extension de la membrane

 $\varepsilon$  = Déformation durant le cisaillement

a<sub>cor</sub> = Aire corrigée.

Pour la correction selon le type de rupture par plan de cisaillement, la correction selon le type de rupture en baril est premièrement appliquée. Puis, à partir du maximum de la contrainte déviatorique, la correction suivante est appliquée :

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_m = \frac{1.5\pi d_o \sqrt{Mfd_o \delta}}{A_{cor}}$$

où :

 $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$  = Contrainte déviatorique reprise par la membrane

 $f = \sigma'_3 \tan \phi'$  = Frottement entre la membrane et l'échantillon où le  $\phi$ ' est supposé à 30°

- $\delta = \delta_{\varepsilon} \frac{\varepsilon \varepsilon_{f}}{\varepsilon_{e} \varepsilon_{f}} = \text{Déformation à n'importe quel moment durant l'essai}$
- $\delta_{\varepsilon} = \frac{\Delta d \tan \alpha}{h_0}$  = Déformation axiale due au mouvement le long du plan de cisaillement

 $\Delta d = \Delta h_p \cot \alpha = \Delta h_p \operatorname{et} \alpha$  sont mesurés directement sur l'échantillon à la fin de l'essai.

Afin de s'assurer d'éviter de faire des erreurs de calculs, il est essentiel de mettre les variables de distance en mètre (m), les contraintes en Pascal (N/m<sup>2</sup>).

Selon la représentation de Lambe, la contrainte déviatorique reprise par la membrane est divisée par deux et ensuite soustraite de *t*, pour obtenir la valeur corrigée. En Cambridge, la contrainte déviatorique peut être immédiatement soustraite de *q* pour avoir la valeur corrigée.



Annexe E - 1 : Caractéristiques géométriques de rupture des échantillons soumis à des essais triaxiaux (La Rochelle et al., 1988a)



Annexe E - 2 : Relation entre le module d'extension et l'épaisseur de la membrane (La Rochelle et al., 1988a)