

Titre du document : Oléoduc Énergie Est – Rapport géotechnique pour la traverse du fleuve Saint-Laurent

Numéro du document : EE4930-JOV-C-RP-0202-Fr

Numéro de révision : 0

Numéro du contrat : 11413



Les Services exp inc.
2555, rue St-Pierre
Drummondville, Québec
Canada, J2C 7Y2



Johnston-Vermette
625, boul. René-Lévesque Ouest, b. 801
Montréal, Québec
Canada, H3B 1R2



Stantec Consulting Ltd.
1200- 59th Avenue SE, Suite 340
Calgary, Alberta
Canada, T2H 2M4

Numéro de révision	Date de révision A-M-J	Raison de l'émission	Auteur du document (entrepreneur)	Examineur (entrepreneur)	Examineur (entrepreneur)	Approbateur (entrepreneur)
0	2015-03-19	Émis pour ingénierie de base	D. Giguère	N. Grandisson	G. Pop	C. Middleton

MISE EN GARDE

Ces documents sont des traductions des documents originaux officiels en anglais qui ont été soumis auprès de TransCanada Pipelines le 20 mars 2015. Ces documents traduits sont fournis dans le but de rendre service aux parties intéressées et ne doivent être utilisés qu'à des fins de consultation. Si le texte d'un document original officiel en anglais ne correspond pas au texte de ces documents traduits, le document original en anglais a préséance. Certains éléments pourraient ne pas être traduits, comme les images contenant du texte, les cartes ou les éléments tirés de pages Web.

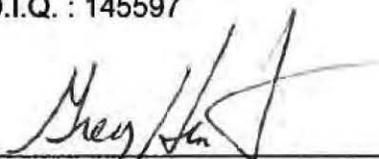
Signatures des Services exp inc.



Brigitte Gagné, Geol., M. Sc.



David Giguère, Eng.
N° O.I.Q. : 145597



Greg Hunt, P. Eng., Senior Mining Engineer

Note légale

Ce rapport a été préparé par les Services **exp** inc. pour le compte exclusif de **Johnston-Vermette**. Tout usage que pourrait en faire une tierce partie ou toute décision basée sur son contenu, prise par cette tierce partie, est la responsabilité de cette dernière. Les Services **exp** inc. ne pourra être tenue responsable pour des dommages éventuels résultant d'une interprétation erronée des résultats transmis ou à l'application et à l'adaptation de ceux-ci par cette tierce partie.

Table des matières

Signatures des Services exp inc.....	2
Note légale.....	4
Liste des annexes: présentée au Volume II du rapport	7
Liste des figures	9
Liste des abréviations	10
Liste de distribution	12
Portée et limitations du rapport	13
1 Introduction.....	15
1.1 Description du projet.....	15
1.2 Contexte géographique et géologique du secteur.....	16
1.2.1 Localisation du projet.....	16
1.2.2 Géologie régionale	16
2 Travaux d'investigation	18
2.1 Cartographie géologique et géotechnique	21
2.1.1 Généralités	21
2.1.2 Visites du site.....	21
2.1.3 Source des données.....	22
2.1.4 Types de roches	23
2.1.5 Structures	24
2.2 Forages.....	26
2.2.1 Forage rotatif	26
2.2.2 Carottage du roc.....	27
2.2.3 Essai SPT	30
2.2.4 Calibration.....	31
2.2.5 Résultats d'essais	31
2.3 Conductivité hydraulique in situ.....	33
2.3.1 Perméabilité Packer	33
2.3.2 Essais Lefranc	35

2.3.3	Puits d'observation	36
2.4	Essais géophysiques	36
2.5	Données bathymétriques.....	37
2.6	Précision et procédures des relevés	37
2.6.1	Sondages terrestres	37
2.6.2	Sondages sur l'eau	38
2.7	Détection de gaz.....	38
3	Essais de laboratoire	41
3.1	Essais sur les sols	41
3.1.1	Analyses granulométriques	41
3.1.2	Limites d'Atterberg.....	41
3.2	Essais sur les carottes de roc.....	42
3.2.1	Général	42
3.2.2	Description géomécanique	42
3.2.3	Sélection des échantillons	43
3.3	Essais qualitatifs de l'eau souterraine	67
3.3.1	Généralités	67
3.3.2	Procédures et méthodologie.....	67
4	Clôture	68
5	Références	69
5.1	Références ASTM	69
5.2	Publications	70

Liste des annexes présentées au Volume II du rapport

Appendix I – Logs

- I a. Borehole Reports
- I b. Rock Mass Characterization

Appendix II – Photographs

- II a. Soil SPT Photographs
- II b. Rock Cores
- II c. Outcrop Mapping Field trips

Appendix III – Laboratory Testing

- III a. Soil Testing
 - III a1. Atterberg Limits
 - III a2. Particule Size Analyses
- III b. Testing on Rock Cores
 - III b1. Point Load Test
 - III b2. Uniaxial Compressive Strength
 - III b3. Uniaxial Compressive Strength with Young's Modulus
 - III b4. Splitting Tensile Strength (Brazilian Test)
 - III b5. Cerchar Abrasiveness, Slake Durability and Point Load Tests
 - III b6. Punch Penetration Test
 - III b7. X-Ray Diffraction Analysis
 - III b8. Petrographic Analysis

Appendix IV – Hydrogeological Data

- IV a. Lefranc and Slug Tests
- IV b. Packer Permeability Results

Appendix V – Borehole Geophysics

- V a: DGI Geoscience – Logistics and Final Report
- V b: DGI Geoscience – Borehole Data
 - V b1. QEEP-059
 - V b2. QEEP-072
 - V b3. QEEP-073

Appendix VI – Bathymetric data

Appendix VII – SPT Testing

Appendix VIII – Groundwater Quality

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Programme d'investigation - site du tunnel (forages dans l'ordre de leur complétion)	20
Tableau 2.2: Stratigraphie générale des sondages de la traverse du Saint-Laurent.....	27
Tableau 2.3: Types d'e tubage utilisés pour les différents sondages.....	28
Tableau 2.4: Sommaire des indices « N » non corrigés	33
Tableau 2.5: Résultats des essais de perméabilité de type Lefranc	36
Tableau 2.6: Puits d'observation – Conductivité hydraulique	36
Tableau 2.7: Coordonnées et élévation au sol des sondages terrestres	37
Tableau 2.8: Coordonnées et élévations au sol des sondages sur l'eau	38
Tableau 2.9: Sommaire des essais de détection des gaz	40
Tableau 3.1: Résumé des analyses granulométriques.....	41
Tableau 3.2: Résultats des limites d'Atterberg	42
Tableau 3.3: Résumé du programme d'essais sur les échantillons de roc	43
Tableau 3.4: Résumé des résultats – Essai de résistance à charge ponctuelle (Point Load Tests).....	45
Tableau 3.5: Résumé des résultats des essais de résistance à la compression uniaxiale	51
Tableau 3.6: Résumé des résultats de résistance à la compression avec module d'Young	53
Tableau 3.7: Résumé des résultats : Essai de traction (essai brésilien).....	54
Tableau 3.8: Sommaire des résultats: Indice d'abrasivité Cerchar (CAI).....	58
Tableau 3.9: Sommaire des résultats: Essai de durabilité Slake	59
Tableau 3.10: Sommaire des résultats – Essais de pénétration.....	61
Tableau 3.11: Sommaire des résultats: X-ray Diffraction (XRD).....	63
Tableau 3.12 : Sommaire des résultats – Pétrographie.....	65

Liste des figures

Figure 1.1: Carte de localisation	15
Figure 1.2: Géologie régionale - le Québec-Appalaches dans le secteur de la ville de Québec	17
Figure 1.3: Coupe montrant les zones Autochtone et Parautochtone.....	17
Figure 2.1: Géologie locale de l'aire d'aménagement du tunnel proposé	19
Figure 2.2: Carte géologique détaillée et des assemblages lithologiques du secteur de Pointe Aubin .	22

Liste des abréviations

ASTM:	American Standard Test Method
ATT:	Limites d'Atterberg
B:	Bedding plane of weakness
BC:	Highly fractured or crushed zone
BREC:	Breccia
BRZ:	Splitting Tensile Strength (Brazilian Test)
CAI:	Cerchar Abrasiveness Index
CAI:	Cerchar Abrasiveness Index
CFEM:	Canadian Foundation Engineering Manual
CL:	Argile
FI:	Fracture Index
FLAS:	Folded laminated argillite/slate
FO:	Foliation
GO:	Groupe Ocean
GPS:	Global Positioning System (Système global de positionnement)
HCL:	Hydrochlorure
ISM:	Interbedded siltstone and mudstone
ISRM:	International Society for Rock Mechanics
J:	Joint
J _a :	Joint Alteration Number
J _n :	Joint Set Number
J _r :	Joint Roughness
JV:	Johnston-Vermette
LC:	Loss of core
LW:	Perte d'eau de forage
MDDELCC:	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MDST:	Mudstone
METASD:	Folded laminated sedimentary rock
NAD 83:	North American Datum 1983
OB:	Mort-terrain
PL:	Point Load Test
PUNP:	Punch Penetration Index
Q':	Tunneling Quality Index
RCR:	Rock Core Recovery
RMR:	Rock Mass Rating
RQD:	Rock Quality Designation
S:	Shear
SFR:	Fractured shale or argillaceous rock
SH:	Shale
SLA:	Slake Durability Index
SLA:	Slate
SPT:	Standard Penetration Test

SS:	Slickenside
SSM:	Finely laminated sandstone-siltstone-mudstone (turbidite cycles)
SST:	Sandstone beds
SZ:	Shear Zone
TBM:	Tunnel Boring Machine
TCPL:	Trans-Canada Pipeline Ltd.
TCR:	Total Core Recovery
TLF:	Tectonic flysch with blocks (shale/slate matrix)
TS:	Petrographics
UCS:	Uniaxial Compressive Strength
UCS+E:	Uniaxial Compressive Strength with Young's Modulus
USCS:	Unified Soils Classification System
XRD:	X-ray Diffraction

Liste de distribution

Rapport distribué à:

Nom	Adresse
Gabriel Pop, ing. Chargé de projet	Johnston-Vermette 801-625, boul. René-Lévesque Montréal (Québec) H3B 1R2

Portée et limitations du rapport

BASES DU RAPPORT

Ce rapport ("Rapport") est basé sur les conditions prévalant sur le site telles que mesurées ou estimées au moment des investigations géotechniques.

Si des changements pouvant avoir un impact sur l'une ou l'autre des conditions géotechniques prévalant sur le site venaient à survenir ou si les travaux de construction débutaient plus de 5 ans après la date d'édition du présent rapport, une réévaluation de nos recommandations serait nécessaire.

Ce rapport est fourni uniquement dans le but de guider les concepteurs sur la base de l'hypothèse que la conception sera faite en conformité avec les codes et exigences normatives applicables. Tout changement dans les paramètres de conception pouvant avoir un impact sur l'analyse géotechnique ou tout questionnement en rapport à l'aspect géotechnique des normes et codes ci-mentionnés devra être transmis à **exp** pour vérification. Des travaux de terrain complémentaires pourraient également être requis.

Les entrepreneurs en charge du projet sont responsables de leur propre interprétation des données contenues dans ce rapport ainsi que de toute investigation complémentaire qu'ils pourraient juger nécessaire. Le nombre de forages requis pour déterminer ou préciser certains paramètres pouvant avoir un impact sur les méthodes ou techniques de construction, leurs coûts, le type d'équipement et le programme de travail peut être supérieur à celui de la présente étude.

La classification et l'identification des sols, des roches, des unités géologiques et des contaminants sont basées sur des enquêtes effectuées conformément aux règles énoncées ci-dessous et demandent l'exercice d'un certain jugement. En conséquence, les programmes d'échantillonnage et d'essais, même mis en œuvre avec l'équipement approprié par du personnel expérimenté, peuvent échouer dans la détermination de certaines conditions particulières.

Tous les rapports d'investigation et d'essai présentés sont basés sur l'hypothèse de la représentativité, sur l'ensemble du site à l'étude, des conditions géotechniques relevées au droit des forages implantés. Les conditions rencontrées entre les forages ou ailleurs sur le site peuvent éventuellement différer de celles observées à l'emplacement de ceux-ci. Les conditions présentent lors de la réalisation des sondages peuvent également varier avec le temps. Le rapport présente les conditions observées aux points échantillonnés au moment des prélèvements.

Si des préoccupations, considérations ou des exigences particulières devaient survenir, celles-ci devraient être divulguées à **exp** pour permettre la réalisation d'investigations supplémentaires hors du cadre du présent mandat.

FIABILITÉ DES INFORMATIONS TRANSMISES

Les évaluations et les conclusions contenues dans le présent rapport sont basées sur les conditions prévalant au moment des investigations ainsi que sur les informations transmises à **exp** par le client ou par d'autres intervenants. Le rapport a été préparé spécifiquement pour le site à l'étude, à partir du programme de développement, de construction, d'évaluation et de conception, tel que communiqué par le Client. Le rapport préparé par **exp** s'appuie sur la bonne foi de ces déclarations, informations et instructions. **Exp** n'acceptera aucune responsabilité pour toute lacune ou inexactitude contenue dans le rapport à la suite de toute omission, fausse déclaration ou actes frauduleux des personnes lui ayant fourni des informations.

Sauf indication contraire, l'applicabilité et la fiabilité des résultats, des suggestions ou opinions exprimées dans le présent rapport ne sont valables que dans la mesure où il n'y a pas eu de modification de l'un des renseignements fournis à **exp**.

NORME DE DILIGENCE

Le rapport a été préparé de manière compatible avec le degré de minutie et de compétence exercée par les ingénieurs-conseils qui pratiquent présentement et localement dans des circonstances similaires. Aucune autre garantie, expresse ou implicite, n'est faite. Sauf indication contraire, le présent rapport ne contient pas de conseils de consultation en environnement.

INTÉGRITÉ DU RAPPORT

Tous les documents, registres, données et fichiers, que ce soit électronique ou non, générés dans le cadre de ce mandat font partie du rapport. Ce matériel comprend, sans s'y limiter, les termes de référence donnés à **exp** par son client («Client»), les communications entre **exp** et le Client, d'autres rapports, propositions ou documents préparés par **exp** pour le compte du client en relation avec le site décrit dans le rapport.

Afin de bien comprendre les suggestions et opinions exprimées dans le rapport, il faut se référer à celui-ci dans son intégralité. **Exp** ne sera pas tenue responsable de tout préjudice résultant de l'utilisation par un tiers d'une portion extraite dudit rapport.

UTILISATION DU RAPPORT

Les informations et opinions exprimées dans ce rapport sont destinées à l'usage exclusif du client. Ce rapport doit être considéré dans son ensemble, incluant toutes les annexes et pièces jointes. Aucune partie du rapport ne peut être utilisée séparément.

Aucune tierce partie ne peut utiliser ce rapport, en tout ou en partie, sans le consentement écrit préalable de **exp**. Toute distribution et/ou utilisation non autorisée de ce rapport ou d'une partie de ce rapport par une tierce partie demeure la responsabilité de cette dernière. **Exp** ne pourra être tenue responsable pour des dommages éventuels résultant d'une interprétation erronée des résultats transmis ou à l'application et à l'adaptation de ceux-ci par cette tierce partie.

FORMAT

Bien que **exp** ait fourni des copies électroniques et papier du présent document ou de toute partie intégrante de celui-ci, seule la version papier scellée et signée en constitue la version originale approuvée. Dans l'éventualité d'une divergence de version, ladite copie papier prévaudra.

Les fichiers électroniques transmis par **exp** utilisent des logiciels et des supports informatiques spécifiques. **Exp** ne sera pas responsable de tout problème de compatibilité de ces fichiers vis-à-vis des supports informatiques actuels ou futurs pouvant être utilisés par le client.

Tout format confondu, les documents ci-décrits demeurent les instruments des services professionnels prodigués par **exp**. Ceux-ci ne sauraient donc être modifiés sans le consentement écrit **exp**.

1 Introduction

Les services professionnels des Services **exp** inc. ont été retenus par Johnston-Vermette (JV) afin de réaliser une étude géotechnique sur le site proposé pour la réalisation du tunnel de la traversée du fleuve Saint-Laurent dans le cadre du projet Énergie Est.

Cette étude a été effectuée dans le but de fournir des informations d'ordre géotechnique et géologique sur la nature et certaines propriétés des sols et du roc en place.

Madame Amélie Duval Courchesne, ingénieure junior, qui a réalisé l'aspect mécanique des roches et monsieur Matthew Bernard, ingénieur de chantier, ont contribué à la rédaction de ce rapport.

Les annexes citées en références dans le présent document sont présentées au volume II du rapport géotechnique.

1.1 Description du projet

Nous comprenons que le projet consiste en la conception et la construction d'un tunnel à travers le socle rocheux situé sous le lit du fleuve Saint-Laurent. La zone des investigations, telle que montrée à la figure 1.1 qui suit, consiste en un corridor d'une largeur de 200 mètres en travers du fleuve Saint-Laurent, le long du parcours proposé du pipeline selon l'alignement prédéterminé par la compagnie TransCanada (TCPL).

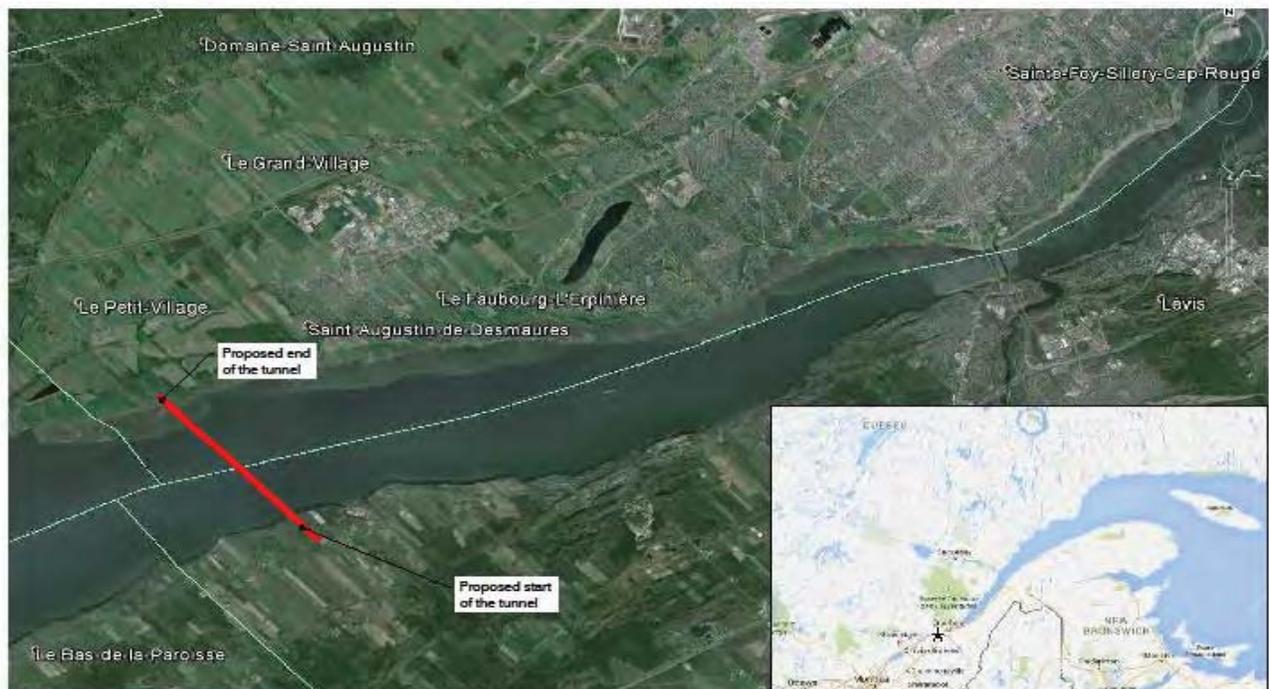


Figure 1.1: Carte de localisation

Cette étude géotechnique a été effectuée conformément aux exigences de notre client, Johnston-Vermette ainsi que des recommandations de TransCanada.

Le rapport qui suit a été préparé spécifiquement et uniquement pour le projet précité. Conformément au mandat qui nous a été confié, ce rapport présente l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre des travaux de reconnaissance géotechniques effectués sur le terrain et en laboratoire ainsi que la synthèse des résultats obtenus. Celui-ci se veut donc purement factuel et ne présente ainsi aucune recommandation ou conclusion particulière en regard de la conception.

1.2 Contexte géographique et géologique du secteur

1.2.1 Localisation du projet

Au moment des investigations, l'emplacement proposé pour la traverse du fleuve Saint-Laurent dans le cadre du projet Énergie Est se situe à environ 15 kilomètres à l'ouest du pont Pierre-Laporte qui assure la jonction entre les villes de Québec, sur la rive nord du fleuve, et de Lévis, située sur la rive sud.

Tel que détaillé à la figure 1.1 présentée en début du présent chapitre, les points d'entrée et de sortie du tunnel proposé se trouveront dans des terres agricoles situées à l'ouest de la ville de Saint-Augustin-de-Desmaures, dans la région de la Capitale-Nationale d'une part, et à l'ouest de Saint-Nicolas, dans l'arrondissement des Chutes-de-la-Chaudière-Ouest de la ville de Lévis, région de Chaudière-Appalaches d'autre part.

1.2.2 Géologie régionale

La région de Québec, incluant le site à l'étude, fait partie d'un ensemble géologique complexe qui débuta par la mise en place de la marge continentale passive des Basses-terres du Saint-Laurent qui fut suivi par la déposition dans le bassin de l'avant-pays d'une séquence de turbidites, communément appelés flyschs, toujours en cours lors de l'orogénèse Taconienne (St-Julien et Hubert, 1975).

La convergence continentale au cours de l'Orogénèse Taconienne résulta en la formation d'une écaïlle tectonique, composée en partie d'unités lithologiques imbriquées résultant de plissements formant la zone parautochtone du secteur de Québec-Appalaches que l'on peut observer dans le secteur à l'étude.

Les limites entre les domaines autochtones et parautochtones établies par diverses études géologiques n'ont cessé de varier avec le temps selon les diverses interprétations qui furent faites. Dans le cas présent, nous considérons toutefois que les formations rocheuses exposées ainsi que celles interceptées sous le fleuve Saint-Laurent lors des sondages sont essentiellement des flyschoides et des turbidites du bassin d'avant-pays localisés au nord de la faille de Duberger (voir la figure 1.2) et appartenant en partie à la zone autochtone des Basses-terres du Saint-Laurent ainsi qu'à la zone parautochtone de la ceinture des Appalaches au sud de cette même faille. Ces roches appartiennent à la formation de Les Fonds du groupe de Saint-Rosalie.

À l'échelle des affleurements observables, il appert que les roches du domaine parautochtone consistent essentiellement en des turbidites, communément appelées flyschs, typiques du bassin

de l'avant-pays de l'Ordovicien supérieur soumises à des plissements à grande échelle et à pendage modéré orientés vers le sud-est au cours de l'Orogénèse Taconienne ou pré-Taconienne. Celles-ci comportent des portions lithologiques imbriquées d'origines variées (voir figure 1.3). Comeau et al. (2004) proposèrent une publication détaillée de cette aire particulière. La documentation mentionne que le pendage des unités imbriquées pourrait aller jusqu'à 45 degrés.

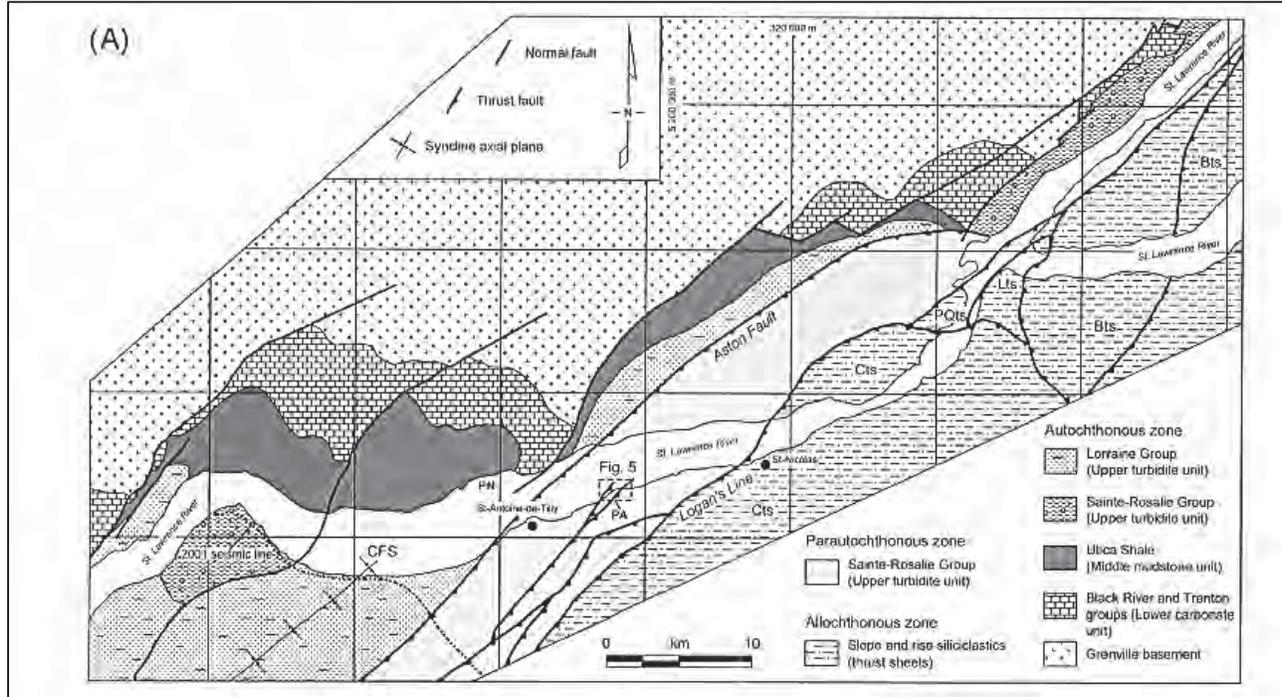


Figure 1.2: Géologie régionale - le Québec-Appalaches dans le secteur de la ville de Québec
 Extrait de Comeau et al. (2004) modifié par Globensky (1987) et adapté de Castonguay et al. (2002)

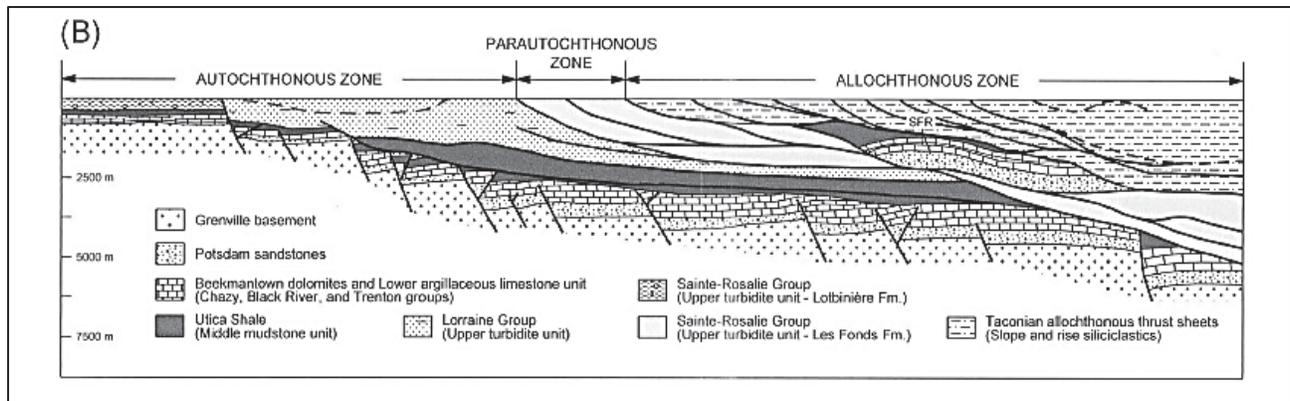


Figure 1.3: Coupe montrant les zones Autochtone et Parautochtone
 Extrait de Comeau et al. (2004) adapté de St-Julien et al. (1987) et de Castonguay et al. (2001).

2 Travaux d'investigation

Les travaux sur le terrain se sont déroulés au cours de la période allant du 12 mars au 30 octobre 2014. Ceux-ci ont consisté en la réalisation de 12 forages (9 marins et 3 terrestres) jusqu'à des profondeurs allant de 24 à 111 mètres sous la surface du terrain actuel.

Les forages sur l'eau ont été effectués à l'aide d'une plateforme constituée d'une barge de 25 mètres par 12 mètres équipée de pieds hydrauliques adaptés aux conditions prévalant en place. La barge a été fournie et opérée par Groupe Océan pour le compte de **exp**.

Les forages géotechniques ont été réalisés par Forage SL à l'aide d'une foreuse conventionnelle hydraulique montée sur patins de type Diedrich D50 et équipée de tubages foncés par rotation ainsi que des accessoires nécessaires à l'échantillonnage des matériaux du sous-sol et du roc.

Les forages terrestres ont également été effectués par Forage SL avec une foreuse de type CME 550X, équipée de façon similaire.

Les travaux ont été réalisés sous la supervision technique d'un représentant de TCPL. La firme JD Barnes était responsable de l'arpentage, sous la responsabilité de JV.

La position approximative des sondages avec leurs coordonnées longitudes/latitudes et UTM (NAD 83) est présentée à la figure 2.1, dans les tableaux 2.5 et 2.6 ainsi que dans les rapports de forages inclus en annexe I du présent rapport.

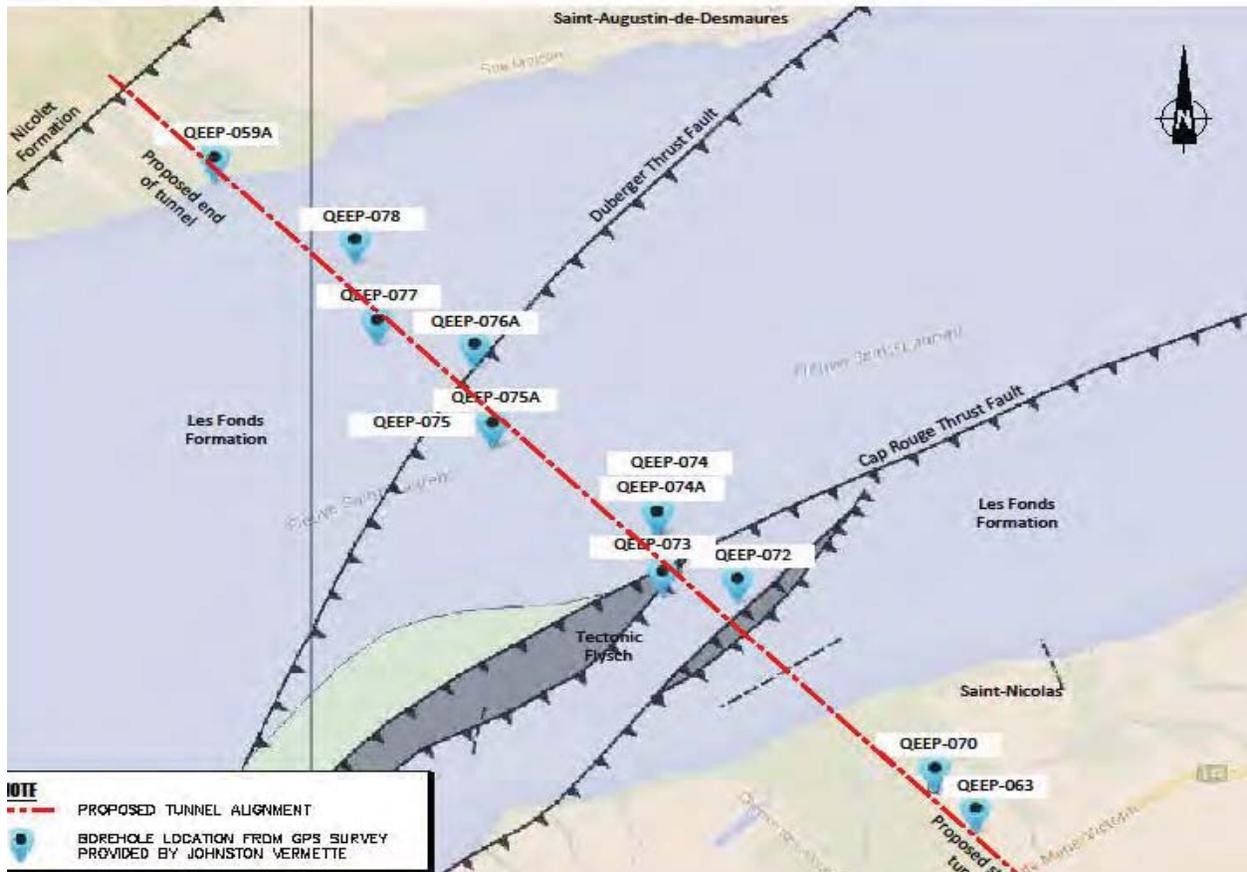


Figure 2.1: Géologie locale de l'aire d'aménagement du tunnel proposé

Information géologique provenant de la carte interactive du site SIGEOM
Énergie et Ressources Naturelles Québec, 2014.

Notez que le terme QEEP-059 sera utilisé au lieu de QEEP-059A pour toutes les références subséquentes dans le présent rapport, incluant les rapports de forage et les essais de laboratoire.

Un carottier normalisé de type cuillère fendue de 51 millimètres de diamètre a été utilisé pour le prélèvement d'échantillons remaniés et pour la mesure de l'indice « N » de l'essai de pénétration standard (ASTM D1586-11). Cet indice permet d'estimer la compacité ou la consistance des sols traversés. L'échantillonnage a été réalisé à des intervalles allant de 1,5 à 3 mètres.

Un tubage diamanté a été utilisé pour forer au sein des dépôts meubles. Afin de minimiser les délais ainsi que l'usure des équipements lorsqu'en présence de dépôts de till dense, un sabot de type tricône a également été utilisé simultanément à l'intérieur du tubage lors de l'avancement des forages.

Le socle rocheux a été échantillonné en continu en utilisant des carottiers diamantés à double et à triple paroi selon les circonstances.

Des essais de conductivité hydraulique en place de type Packer à un palier ainsi que selon la méthode Lugeon à paliers multiples ont été réalisés à l'aide d'un système pneumatique Packer double. Les intervalles d'essai Packer variaient de 3 à 5 mètres de longueur et ont été réalisés à des emplacements présélectionnés avec un équipement adapté aux dimensions des trous de forage.

Les forages terrestres comprenaient la réalisation d'essais de perméabilité de type Lefranc au sein des dépôts meubles de même que l'installation d'un puits d'observation au forage QEEP-059.

La surveillance de la présence de gaz souterrain en utilisant un détecteur approprié pour la mesure des taux d'oxygène, de méthane, de sulfure d'hydrogène et de monoxyde de carbone a été effectuée lors de la progression des sondages en conformité avec le programme d'investigation ainsi que du plan de santé et sécurité de **exp**.

La portée des investigations techniques est résumée au tableau 2.1 qui suit.

Tableau 2.1: Programme d'investigation - site du tunnel (forages dans l'ordre de leur complétion)

Catégorie	Sous-Catégorie	Tâche	Sondages											
			QEEP-063	QEEP-070	QEEP-078	QEEP-077	QEEP-076A	QEEP-075	QEEP075A	QEEP-073	QEEP-072	QEEP-074	QEEP-074A	QEEP-059
Forage	Positionnement	Longitude / Latitude	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		UTM NAD83	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Calibre	NQ	✓	✓	✓	✓	✓		✓					
		HQ								✓	✓	✓	✓	✓
		Tubage double	✓	✓	✓	✓								
		Tubage triple					✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Essais In Situ	Essai de pénétration standard (SPT)	Essai	✓	✓			✓	✓	✓				✓	
		Calibration d'énergie												✓
	Environnemental	Échantillon d'eau												✓
	Essai de perméabilité Packer	Palier simple		✓	✓	✓								
		Essai Lugeon à 5 paliers					✓		✓	✓	✓			✓
	Caméra optique	Orientation								✓	✓			✓
		Géophysique «Downhole»								✓	✓			✓
		Essai de détection des gaz							✓		✓	✓	✓	✓

2.1 Cartographie géologique et géotechnique

2.1.1 Généralités

Les descriptions précises des diverses unités géologiques de chaque échantillon de roc ont permis une reconstruction partielle de la stratigraphie et la structure du socle rocheux. Les informations recueillies permettront ainsi au concepteur du tunnel d'obtenir une section transversale des caractéristiques géologiques et structurales. L'identification des unités sédimentaires pendant l'examen des échantillons a également permis la sélection d'échantillons représentatifs à être soumis aux essais pour la détermination des propriétés du roc.

Onze des douze forages effectués ont pénétré le socle rocheux. Un total de 691 mètres linéaires de roc fut prélevé par carottage et soumis à des descriptions géologiques et de mécaniques des roches détaillées. Les descriptions et observations effectuées sont présentées en annexe I.

2.1.2 Visites du site

Dans le but d'obtenir une meilleure compréhension des unités et structures géologiques locales présentes sur le site, un géologue senior de nos services ainsi qu'un ingénieur géologue de TCPL ont procédé à deux visites sur place au niveau de la rive sud du Saint-Laurent laquelle permettait d'excellentes possibilités d'observation du socle rocheux à marée basse. Les visites ont été effectuées le 18 septembre ainsi que les 6 et 7 octobre 2014 dans le secteur de Pointe Aubin à proximité de Saint-Nicolas.

Le but de ces visites était de permettre de corréliser l'observation des structures rocheuses interceptées lors des carottages par rapport aux affleurements observables, de visualiser les contraintes géologiques auxquelles ces unités ont été soumises et le comportement des masses rocheuses affectées par les altérations induites par les conditions atmosphériques (exposition à l'air et à l'eau).

Des explorations à marée basse réalisées à l'Anse Aubin ont permis l'observation des différentes lithologies rencontrées lors du prélèvement des carottes de roche, à une échelle différente. Les structures rocheuses ont également été observées, mesurées et photographiées. Des échantillons de roches ont également été prélevés le long des falaises et sur les affleurements à marée basse.

Les données GPS ont été enregistrées par TCPL pour référence en rapport à la collecte des échantillons et de mesures de certaines structures. Toutes les informations pertinentes recueillies au cours du programme de cartographie de surface étaient sous la responsabilité de TCPL et ne font pas partie intégrante du présent rapport. **Exp** et TCPL ont conservé des doublons de spécimens pour chaque type de roche recueillie.

2.1.3 Source des données

La région a été étudiée avec beaucoup de détails, car elle offre de bons affleurements rocheux dans un environnement géologique structurellement complexe et hautement significatif de l'Orogénèse Taconienne qui fut l'objet de plusieurs publications et études universitaires (voir la section 4.0 - Références).

Les visites de terrain ont été prévues pour permettre la visite des affleurements rocheux tels que détaillés dans la publication de Comeau et al. (2004) décrivant les sédiments flyschoides des zones autochtones et parautochtones et en particulier les unités de roches composant les tranches imbriquées de la zone allochtone. La publication présente une carte géologique détaillée (Figure 2.2) de la région de Pointe Aubin et des assemblages lithologiques exposés sur le rivage à marée basse. D'autres références géologiques (par exemple, St-Julien, 1968 et 1995) ont été consultées avant la visite du site. D'autres références géologiques (e.g., St-Julien, 1968 et 1995) ont été consultées préalablement aux visites de site.

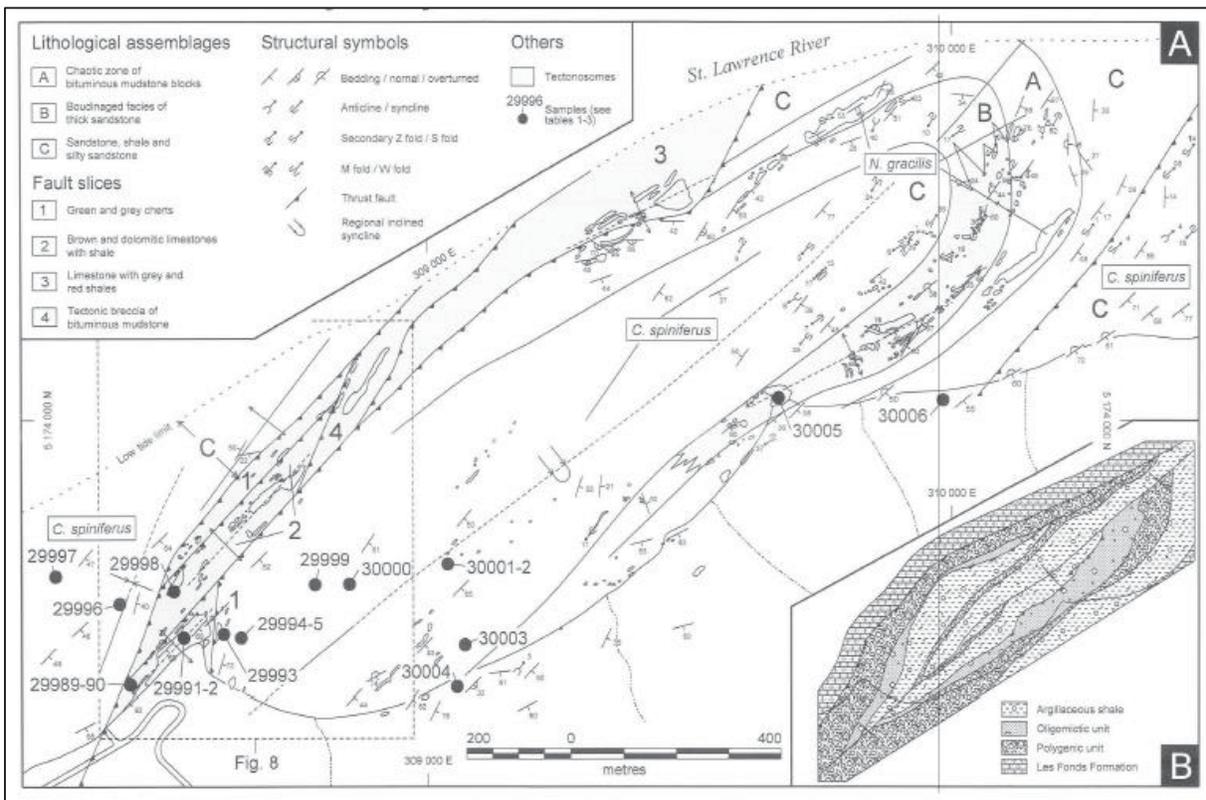


Figure 2.2: Carte géologique détaillée et des assemblages lithologiques du secteur de Pointe Aubin de Comeau et al. (2004)

Les principales unités rocheuses décrites dans les carottes de roche, ainsi que celles observées dans les affleurements pendant les visites sur le terrain, sont résumées à la section 2.1.4 du présent rapport.

2.1.4 Types de roches

2.1.4.1 Visite de site

De nombreux assemblages lithologiques ont été observés sur une distance d'environ 3 000 mètres par 300 mètres sur la rive et le long des falaises entre Pointe Aubin à l'ouest et le chemin des Hirondelles à l'est.

Les falaises étaient composées de séquences flyschoid, principalement des turbidites en lits minces, souvent très repliés, qui semblaient contenir des tranches, des rochers et des blocs (olistostromes de différentes tailles, de centimétrique à l'échelle métrique) des unités rocheuses paraautochtones et éventuellement allochtones telles que des grès épais boudinés, des calcaires avec schiste gris et rouge, des mudstones bitumineux, et des siltstones siliceux gris et verts.

De grands rochers d'un mètre étaient observables le long de la rive après qu'ils se furent détachés de leur matrice de flysch généralement friable et résistant mal aux intempéries (pluie, vent, saisons, et marées). Ces blocs étaient plus abondants sur la rive à la base des falaises les plus proches de Pointe Aubin.

L'état général de la nature argileuse et finement litée du substratum rocheux de la falaise s'avère très altérée et friable, rendant difficile toute tentative d'escalade.

Le socle rocheux observé sur les affleurements à marée basse présente les mêmes formations lithologiques que celles vues le long des falaises. Les structures géologiques indiquées sur la figure 2.2 sont situées à moins de 500 mètres à l'ouest du tracé du tunnel proposé. Leur axe général NE-SO indique qu'il traverse vraisemblablement le tracé du tunnel proposé, mais en fonction de l'angle de plongée des structures plissées, on ne peut affirmer avec certitude que les roches à la surface se trouvent effectivement en travers du chemin du tunnel.

Les moitiés orientales et occidentales visées dans le texte qui suit correspondent aux moitiés est et ouest de la structure détaillée à la figure 2.2. La moitié orientale de la section visitée exhibait principalement des séquences de turbidite constituées de lits de mudstone, siltstone et de grès, ainsi que quelques occurrences des faciès boudinés de grès épais. La moitié ouest de la section visitée présentait différents faciès, allant d'une zone chaotique contenant des blocs de mudstone bitumineux à turbidites, des roches carbonatées, d'épais grès boudinés, des brèches tectoniques, des schistes laminés gris et verts ou des siltstone silicifiés, et des shales gris, rouges et verts, pour ne mentionner que ceux-là.

Pas de drainage autre que celui de surface ou quelques infiltrations naturelles des eaux souterraines ainsi que des ruisseaux d'eau claire ont été observés le long des falaises. Ainsi, aucun drainage rocheux acide n'est soupçonné à cette localité particulière.

Un rapport photographique des visites de terrain est présenté à l'annexe IIc du présent rapport.

2.1.4.2 Carottes de roc

Les carottes de roche extraites ont montré la plupart des lithologies et types de roches observées au cours des visites faites sur le terrain.

Les carottes des forages situés au nord du chenal de navigation et au nord de la faille de chevauchement Duberger (QEEP-059 à QEEP-075A, du nord au sud) ont été plus représentatives des séquences de turbidites non déformées à légèrement déformées typiques, composés de minces lits de mudstone, de siltstone et de grès micacé.

Les carottes de roc provenant des forages situés au sud du chenal de navigation affichent une variété importante de types de roches en de vastes unités et de larges bandes de l'ordre de plusieurs mètres d'épaisseur, ou en de plus petits blocs centimétriques. Les types de roches comprennent notamment des turbidites convolutées, des schistes bitumineux, des schistes graphitiques noirs indurés; des brèches tectoniques, des séquences de flysch pliées et friables constituées de schiste gris, vert et noir ou d'argilite, des siltstones silicifiés gris et verts et des grès épais et massifs, comme on peut le voir sur la rive. Toutes les lithologies présentes ont été affectées par un faible métamorphisme régional à des degrés divers. Un faible métamorphisme régional a été confirmé dans les lames minces (pétrographie) par l'abondance de séricite et de micro-plis dans plusieurs directions.

Les particularités de chaque lithologie rencontrées sont détaillées dans les rapports de forages présentés à l'annexe I. Les photographies des boîtes de carottes de roc se trouvent dans l'annexe IIb. De plus amples détails lithologiques des différentes lithologies ainsi que l'interprétation de l'environnement géologique pour la plupart des types de roches peut être trouvée dans les rapports d'analyses pétrographiques complètes effectuées sur plusieurs échantillons de roc. Ceux-ci sont présentés à l'annexe III b8.

2.1.5 Structures

Les structures géologiques observées, à la fois sur les carottes de roche et dans les affleurements rocheux observables le long de la rive sud, étaient de nature similaire et principalement de petite échelle. Même les imbrications ne semblent pas montrer de zones de fracture catastrophiques, à tout le moins aux profondeurs d'interruption des forages.

Des zones de cisaillement, pouvant possiblement constituer des imbrications, étaient généralement de quelques centimètres à un mètre de largeur. Cependant, les déplacements le long de failles, lorsqu'observables dans les falaises le long de la rive sud, pourraient aller de quelques centimètres à plusieurs mètres de décalage.

Les unités lithologiques observées sur les affleurements étaient de nature similaire à celles ci-dessus et présentaient plusieurs types de plissements et de failles allant de plis légèrement ouverts à microscopiques, des synclinaux locaux et régionaux ainsi que des anticlinaux avec courbures plongeantes dans des directions est et ouest, à des plis renversés serrés témoignant d'événements structuraux majeurs au cours de l'Orogenèse Taconique. Les principaux linéaments ont été orientés nord-sud avec un pendage apparent, mais variable sur le sud-est. Les ensembles de joints étaient bien exposés, recoupant souvent les plans de stratification des principales unités de turbidite presque perpendiculairement et étroitement espacés (par exemple, 50 cm d'intervalle) dans les unités de turbidite riches en mudstone. Les mesures structurelles prises sur le terrain étaient les mêmes que celles enregistrées dans la publication de Comeau (2006).

Les principales caractéristiques structurelles des carottes de roche ont été relevées lors de l'examen géomécanique détaillé effectué au laboratoire de **exp**. Les détails sont présentés à l'annexe Ib dans les rapports « caractérisation de massif rocheux ».

Plusieurs types de structures ont été observés dans les échantillons de roc prélevés par carottage. Les forages les plus septentrionaux (QEEP-059 à QEEP-075A) présentaient des séquences de turbidite très légèrement inclinées, possiblement à pliage ouvert lorsque l'angle de pendage des lits variait sensiblement, en particulier dans les sondages QEEP-059, QEEP-078 et QEEP-077.

Certaines structures sédimentaires avec micro failles sont apparentes, jusqu'aux derniers mètres de forage où une perturbation possible se traduit par la présence de veines de calcite aléatoires, des fracturations mineures de la roche et des plans de stratification peu perturbés. Les roches provenant de ces forages sont identifiées comme appartenant à la formation de Les Fonds du Groupe de Sainte-Rosalie et sont probablement encore structurellement situées dans la zone autochtone.

La zone plus centrale du Saint-Laurent située au nord du chenal de navigation, et représenté par les forages QEEP-076A et QEEP-075A montrent déjà des signes de perturbation en profondeur. Les séquences de turbidite régulièrement stratifiées à la surface de la roche deviennent rapidement pliées, tordues et présentent plusieurs micros failles ainsi que des zones de cisaillement à certaines profondeurs. Bien que la nature de la roche soit relativement compatible avec la formation de Les Fonds, leur cadre tend vraisemblablement à indiquer le passage probable de la zone autochtone aux zones parautochtones. La figure 2.1 montre que les forages QEEP-075A et QEEP-076A seraient situés près de la faille de chevauchement de Duberger. Il est incertain à ce stade de statuer dans quelle mesure en termes de profondeur, les roches provenant des forages QEEP-076A et QEEP-075A de même que ceux localisés plus au sud ont pu être touchés par les multiples systèmes de failles qui se produisent à travers le Saint-Laurent, y compris la faille de Cap-Rouge.

Le roc provenant des forages situés au sud du système de failles de Duberger et au sud du canal de navigation (QEEP-074 / 074A à QEEP-063) présente des lithologies beaucoup plus variées et perturbées comme on le voit sur le rivage et les falaises de la rive sud. Le roc des forages QEEP-073 et QEEP-072 est particulièrement touché en raison de leur proximité avec le système de failles de Cap-Rouge. Micro failles, déformations synsédimentaires (bosses), plissements, zones de cisaillement, ensembles mixtes, zones de roches fracturées ou concassées, veines de calcite et lacunes de tension ou de compression remplies de calcite sont toutes des caractéristiques indicatives d'une zone structurellement active pendant l'Orogénèse Taconienne. Ces forages se trouvent dans la zone paraautochtone et contiennent potentiellement des blocs de matériaux allochtones du système géologique des Appalaches. Les principales structures géologiques et types de roches ci-décrits sont détaillés dans les rapports de forage et les rapports d'examen de mécanique des roches, présentés à l'annexe I.

2.2 Forages

Tel que discuté précédemment, un total de douze (12) forages (3 terrestres et 9 marins) ont été effectués le long du parcours proposé pour l'aménagement du tunnel.

La localisation des forages sur le terrain préalablement à nos interventions a été réalisée par les représentants de Johnston-Vermette.

La progression des sondages au sein du mort-terrain s'est effectuée au moyen de tubages forcés par rotation de calibre adéquat.

L'échantillonnage du roc a été effectué au moyen de carottiers de type NQ (à double paroi) et de types NQ₃ et HQ₃ à triple paroi selon l'emplacement des sondages.

2.2.1 Forage rotatif

Un total de douze (12) forages ont été réalisés à travers les couches de morts-terrains, dont un (1) partiellement complété (QEEP-076), dans la zone d'investigation. Des tubages de calibre PW, HW et NW ont été utilisés pour la progression des forages dans le mort-terrain, selon l'emplacement du forage (voir le tableau 2.1).

La stratigraphie générale des forages marins est composée de sable, de sable avec peu de silt et de gravier, et des couches intermittentes de till glaciaire. Dans le cas des forages terrestres, des dépôts de sable avec un peu de gravier ont été rencontrés entre des couches de till.

Il est à noter que l'échantillonnage des sols a été rendu fort complexe dans l'ensemble des forages marins et terrestres en raison de la présence importante de gravier, de cailloux arrondis, de galets et de blocs au sein du mort-terrain.

Le tableau 2.2 qui suit présente un résumé général de la stratigraphie du sous-sol sous le lit du fleuve pour chaque trou de forage, du sud au nord.

Tableau 2.2: Stratigraphie générale des sondages de la traverse du Saint-Laurent

Sondage QEEP-	Élévation de surface (m)	Sable avec traces de silt et gravier (m)	Silt argileux à argile silteuse (m)	Gravier sableux à sable avec un peu de silt et gravier (m)	Till glaciaire (m)	Profondeur du roc (m)	Élévation du roc (m)	Profondeur totale du forage (m BGS)
063*	63.77	14.7 à 15.0	-	1.2 à 7.3	7.3 à 14.7 15.0 à 25.9	25.90	37.87	29.90
070*	60.81	-	-	-	1.1 à 1.7	1.68	59.13	111.35
072	-7.96					7.73	-15.19	81.96
073	-11.69					6.42	-18.11	81.20
074	-18.74					14.69	-33.43	73.19
074A	-18.49					9.87	-28.36	79.20
075	-10.88	-	-	2.5 à 3.0	3.0 à 23.8	-	-	23.83
075A	-11.18	4.5 à 8.3 11.7 à 16.1	8.3 à 11.7	-	16.1 à 49.6	49.56	-60.74	96.77
076A	-13.80	13.9 à 15.7 27.0 à 29.9	-	15.7 à 18.0	1.1 à 13.9 18.0 à 27.0 29.9 à 34.9	34.87	-48.57	81.66
077	-10.18					10.26	-20.44	80.24
078	-7.35					8.38	-15.73	80.16
059**	4.49	-	5.8 à 12.3	-	0.0 à 5.8 12.3 à 16.1	16.08	-11.59	81.25

* Forage terrestre – rive sud

** Forage terrestre – rive nord

Il est à noter que le forage QEEP-075 a été interrompu avant d'atteindre le socle rocheux. Un deuxième forage, QEEP-075A, a été implanté et s'est poursuivi à travers le substratum rocheux. En outre, la nomenclature « QEEP-059 » a été utilisée tout au long du projet, par opposition à « QEEP-059A » comme cela a été prévu initialement.

La portée de l'investigation ne comprenait pas les essais SPT ni l'échantillonnage des sols pour des forages QEEP-072, QEEP-073, QEEP-074, QEEP-074A, QEEP-077 et QEEP-078, tel qu'indiqué dans le tableau 2.1.

2.2.2 Carottage du roc

Un total de onze (11) forages s'est poursuivi à travers le substratum rocheux. Les forages QEEP-078 et QEEP-077 ont été effectués par forage au diamant à l'aide d'un tubage double paroi de calibre NQ de 1,5 mètre de longueur unitaire fournissant des échantillons de 48 mm de diamètre.

Les forages QEEP-076A et QEEP-075A ont été carottés par forage au diamant à l'aide d'un tubage à triple paroi de calibre NQ₃, de 1,5 mètre de longueur unitaire, fournissant des carottes de 45 mm de diamètre.

Les forages QEEP-059, QEEP-072, QEEP-073 et QEEP-074 / QEEP-074A ont été carottés par forage au diamant à l'aide d'un tubage à manchon à triple paroi de calibre HQ₃, fournissant des carottes de 61 mm de diamètre.

Les carottes ont été forées en utilisant des méthodes conventionnelles de carottage rotatif. Le tableau 2.3 résume ces caractéristiques.

Tableau 2.3: Types de tubage utilisés pour les différents sondages

Sondage QEEP-	Type d'échantillonneur	Nombre de tubes	Diamètre du tube (mm)
059, 072, 073 et 074/074A	HQ ₃	3	61
075, 075A et 076A	NQ ₃	3	45
063, 070, 077 et 078	NQ	2	48

Le type de tube carottier et le calibre ont été modifiés au cours du programme sur le terrain dans le but d'augmenter la qualité des carottes extraites. Les calibres de tubage de plus grand diamètre et les méthodes d'extraction de carottes à paroi triple permettent d'augmenter la récupération et réduire le risque de fractures mécaniques.

Les carottes de forage de calibre NQ obtenues avec des méthodes d'extraction pour tube carottier à double paroi peuvent avoir entraîné une augmentation du nombre de fractures mécaniques enregistrées en tant que fractures naturelles. Cependant, compte tenu de la nature friable de la roche sédimentaire finement litée trouvée dans certaines zones, le diamètre du tube carottier et la méthode d'extraction peuvent avoir eu moins d'influence sur la récupération et la description géomécanique des échantillons.

Tous les forages ont été scellés avec un coulis de bentonite.

La procédure suivante, proposée par les représentants de TCPL, a été adoptée pour la réalisation des sondages QEEP-076A, QEEP-075A, QEEP-073, QEEP-072, QEEP-074, QEEP-074A et QEEP-059. La procédure détaillée est la suivante:

1. Le technicien reçoit l'échantillonneur de l'équipe de forage et le dépose sur la table.
2. Le technicien demande la profondeur de forage.
 - a. Les informations suivantes sont notées sur la boîte d'échantillons :
 - i. Numéro d'échantillon, et
 - ii. Profondeur (mètres).
3. Le dessus de l'échantillonneur est retiré.
4. Pendant que l'échantillon était dans le tubage, les tâches suivantes furent effectuées:
 - a. Le technicien aligne l'échantillon dans le tubage du mieux possible, du début à la fin de l'échantillon.
 - b. Des blocs séparateurs appropriés sont placés au début et à la fin de l'échantillon avec les profondeurs inscrites dessus.

- c. Le technicien mesure et marque à l'aide d'un marqueur approprié chaque mètre de longueur le long de l'échantillon en inscrivant la profondeur correspondante (ex. 36 m); les intervalles de 0,5 mètre sont notés d'un trait seulement.
Une étiquette de forage (ex, "QEEP-076A" inscrit sur un morceau de bois) est placée au-dessus du tube.
 - d. Une photo de l'échantillon à l'intérieur du tube est prise en mettant en évidence l'étiquette et les blocs de référence.
 - e. La longueur totale de récupération de l'échantillon est mesurée (mètres).
 - f. En inspectant toute la longueur de la carotte, le technicien marque toutes les fractures naturelles d'un trait de couleur différente.
 - i. Toutes les fractures naturelles furent marquées en rouge avant de prendre une autre photo.
 - ii. La discrimination entre les fractures naturelles et mécaniques s'avère difficile dans le roc sédimentaire lité; en cas de doute, la fracture est inscrite comme étant naturelle.
 - g. Le RQD est mesuré (somme des morceaux de plus de 10 cm).
5. L'échantillon est transféré de l'échantillonneur à la boîte d'échantillons.
 6. Les blocs séparateurs sont placés aux endroits appropriés.
 7. Les foreurs reprennent les tubes échantillonneurs vides.
 8. Les étapes 1 à 8 sont répétées jusqu'à ce que la boîte d'échantillons soit pleine.
 9. Lorsque la boîte est pleine:
 - a. Une photo de la boîte pleine est prise en montrant clairement les étiquettes.
 - b. La boîte est refermée et scellée.

Pour les forages QEEP-072, QEEP-074 et QEEP-059, des échantillons choisis ont été enveloppés dans du plastique selon la procédure ci-dessous. Le but de cette étape était d'évaluer si la résistance de la roche pouvait être affectée par la teneur en eau de l'échantillon. La procédure est la suivante:

Afin de préserver la teneur en humidité de l'échantillon, il était impératif que les échantillons soient enveloppés dès que celui-ci a été noté et photographié. Le représentant de TCPL a donc recommandé le recours à la procédure suivante pour sceller les échantillons :

1. L'échantillon est décrit selon les étapes mentionnées précédemment.
2. Après avoir placé l'échantillon dans la boîte, des portions d'échantillon sont sélectionnées selon le critère mentionné plus haut.
3. Les échantillons sont entièrement enveloppés dans une pellicule de plastique pour maintenir sa teneur en humidité - les échantillons doivent être enveloppés avec deux couches de film plastique et les extrémités des échantillons doivent être vérifiées pour s'assurer qu'elles soient bien fermées.
4. Les échantillons scellés sont replacés dans la boîte d'échantillons dans l'orientation appropriée.

Lors de la sélection des échantillons à être scellés, les directives suivantes ont été utilisées :

1. Tous les échantillons doivent être représentatifs des formations rocheuses présentes dans le forage.
2. Lorsque cela est possible, les échantillons devraient être libres d'irrégularités telles que les joints fusionnés ou autres plans de faiblesses. Un examen visuel approfondi de la carotte (humide et sèche) doit être fait pour identifier la présence de telles caractéristiques défavorables.
3. Des échantillons de 30 cm de longueur doivent être enveloppés - ceci peut être accompli soit en enroulant une pièce d'un seul tenant de 30 cm ou plus; ou en enveloppant trois pièces adjacentes de dimensions suivantes:
 - a. Une (1) pièce d'un seul tenant de 15 cm ou plus
 - b. Deux (2) pièces de 8 cm ou plus

TCPL a recommandé que des échantillons réservés à cet usage particulier soient prélevés tous les 10 ou 12 mètres en moyenne.

Les carottes de roc ont été manipulées et entreposées conformément à la norme ASTM D5079-08. Des photos des carottes ont été prises avant leur retrait de l'échantillonneur ainsi que dans les boîtes, à la demande de TCPL. Les fissures mécaniques et naturelles, le classement géotechnique général, les indices TCR et RQD ont été enregistrés et notés sur place comme analyse préliminaire à la description géomécanique finale en laboratoire. En outre, la classification et l'évaluation ont été complétées au laboratoire comme indiqué à la section 3.2.

La description des carottes de roc a été réalisée selon la pratique standard de **exp** pour les forages QEEP-063, QEEP-070, QEEP-078, et QEEP-077. Cette procédure d'enregistrement est légèrement différente que celle décrite ci-haut, car elle ne comprend pas de prise de photos, ni marquage des caractéristiques ou des profondeurs directement sur place. Le tout ayant été complété à notre laboratoire de Montréal.

2.2.3 Essai SPT

L'essai de pénétration standard (SPT) est largement utilisé en investigation géotechnique. L'essai normalisé consiste à enfoncer par battage une cuillère fendue de 50 millimètres de diamètre extérieur dans les sols en place en laissant tomber un marteau d'un poids de 63,5 kg d'une hauteur de chute libre de 760 millimètres. Après un enfoncement initial de 150 millimètres, le nombre de coups requis pour l'obtention d'un enfoncement du carottier de 300 millimètres donne la valeur de l'indice « N » SPT.

Cet indice est une mesure qualitative directe très utile lors des investigations, car elle permet d'estimer la compacité ou la consistance in situ des sols traversés tout en permettant le prélèvement d'échantillons remaniés des dépôts en place.

Des essais de type SPT furent réalisés au sein des dépôts meubles des sondages QEEP-076A, QEEP-075/075A, QEEP-070, QEEP-063, et QEEP-059. Bien que normalement selon des intervalles de 3 mètres, la fréquence d'essai a été portée à tous les 1,5 mètre lorsque les conditions de sols le demandaient.

Les indices “N” relevés ainsi que la profondeur des essais effectués peuvent être consultés dans les rapports de forage individuels présentés en annexe I du présent document. Le tableau 2.4 qui suit présente également un résumé des résultats.

2.2.4 Calibration

La “American Society for Testing and Materials” (ASTM) recommande de standardiser les indices N en les multipliant par le ratio de l’énergie transférée au train de tiges et 60% de l’énergie potentielle du marteau. Ceci compense le taux d’efficacité très variable des différents modèles de marteau SPT en usage et permet d’améliorer la fiabilité des estimations obtenues lors des essais.

L’efficacité du marteau peut être mesurée au moyen d’un analyseur de battage (Pile Driving Analyzer ou PDA). Ce système mesure l’énergie transférée au train de tige par le marteau au moyen de capteurs d’accélération et de tension.

Des mesures d’énergie de battage ont été réalisées conformément à la norme ASTM D4633-10, sur une foreuse de type CME 550X munie d’un marteau de battage automatisé lors de la réalisation du forage QEEP-059. L’efficacité du marteau a été évaluée à 78,9% pour un écart type de 2,4%. Les détails des mesures effectuées sont présentés dans le rapport de calibration d’énergie de battage en annexe VII avec les valeurs d’essai SPT non corrigées. L’efficacité de battage n’a pas été mesurée aux autres sondages.

2.2.5 Résultats d’essais

Les résultats des essais SPT pour les sondages QEEP-059, 063, 070, 075/075A et 076A sont résumés au tableau 2-3. Les essais SPT n’ont toutefois pas été complétés ou réalisés aux sondages QEEP-072, 073, 074, 077 et 078 afin d’optimiser le carottage du socle rocheux.

Pour un estimé conservateur des paramètres des sols, les valeurs « N » de l’ensemble des sondages pourraient être considérées comme valeurs d’indice N60, à l’exception de QEEP-059. Compte tenu du ratio d’efficacité mesuré (voir les résultats de calibration PDA à la section 2.3.1), les valeurs de l’indice « N » pour le sondage QEEP-059 devraient être corrigées ou normalisées de la façon suivante :

$$N_{60} = N \left(\frac{ER_r}{60} \right)$$

où:

ER_r est le ratio d’énergie connu du train de tige

Notez que les valeurs de l’indice « N » varient avec la contrainte de confinement et par conséquent, avec la contrainte verticale des sols. Tel que proposé dans la 4^{ième} édition du Manuel canadien d’ingénierie des fondations (MCIF), il faut corriger la contrainte verticale pour normaliser le nombre de coups en place. Considérant les profondeurs auxquelles certains essais furent effectués, il y a lieu d’appliquer ce facteur de correction. Ce dernier peut être approximé par le biais de la formule suivante :

$$CN = 0.77 \log_{10} \left(\frac{1920}{\sigma'_v} \right)$$

où:

* C_{N-1} est le coefficient correcteur pour la contrainte verticale
 σ'_v est la contrainte verticale effective au niveau de la valeur N en kPa

*Cette correction n'est pas valide pour une contrainte effective verticale de moins de 24 kPa.

Certains essais SPT furent réalisés à l'aide d'une cuillère fendue de calibre 76 millimètres contrairement au calibre standard de 51 millimètres proposé par la norme ASTM D1586-11 de façon à s'assurer une meilleure récupération des échantillons lorsque des conditions de récupérabilité difficiles le motivait.

Le calibre des cuillères fendues est indiqué au tableau 2.4. Les valeurs de « N » devraient être prises avec discernement, mais peuvent être corrigées telles que décrites dans publication spéciale de la norme ASTM STP523 – Détermination et évaluation indirecte de la densité relative et son rôle dans les projets géotechniques dans les sols pulvérulents. Horn H., Lacroix Y (1973). Un facteur de correction de $0.64N_n$ devrait s'appliquer dans ces cas précis. Notons que cette correction ne fournit pas de valeur « N » mais plutôt des valeurs SPT équivalentes.

Occasionnellement, les données obtenues lors des essais SPT peuvent ne pas s'avérer représentatives des conditions in situ. Ceci peut survenir pour diverses raisons, mais peut se résumer comme suit:

- Enfouissement de la cuillère fendue dans des dépôts remaniés (forage foncé trop profondément avant l'échantillonnage);
- Enfouissement de la cuillère fendue complètement sous le niveau du tubage;
- Délavage des sols à échantillonner sous le tubage par pression d'eau trop forte;
- Pression hydrostatique dans le tubage insuffisante (remontée de sol dans le tubage).

Ces difficultés sont inhérentes aux forages en profondeur. Les valeurs d'indices « N » enregistrées pouvant avoir été influencées par ces phénomènes sont notées avec un astérisque (*).

Le tableau 2.4 présente les indices « N » non corrigés pour l'ensemble des sondages effectués le long de tracé du futur tunnel. Le lecteur pourra également se référer aux diverses corrections des indices proposées dans la 4^{ième} édition du Manuel canadien d'ingénierie des fondations.

Tableau 2.4: Sommaire des indices « N » non corrigés

Sondage QEEP-059												
Échantillon	SS-1	SS-2	SS-3	SS-5	SS-8	SS-9	SS-10	SS-11	SS-12	SS-13	SS-14	
Indice « N »	3	34	R	R	26	16	34	40	36	116	R	
Sondage QEEP-063												
Échantillon	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4	SS-5	SS-6	SS-7	-	-	-	-	
Indice « N »	27	13	16	36	R	54	R	-	-	-	-	
Sondage QEEP-070												
Échantillon	SS-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Indice « N »	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sondage QEEP-075												
Échantillon	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4	SS-5	SS-6	SS-7	SS-8	-	-	-	
Indice « N »	89	12	62	47	R	R	R	35	-	-	-	
Sondage QEEP-075A												
Échantillon (calibre)	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4	SS-5	SS-6 (N)	SS-8 (N)	SS-9	SS-10	SS-11	SS-12	SS-13
Indice « N » (calibre)	5	1*	14*	33	30	R (N)	R (N)	11*	112	104	17*	R
QEEP-076A												
Échantillon (calibre)	SS-1	SS-2	SS-3 (N)	SS-4 (N)	SS-5	SS-6	SS-7	SS-8	SS-9	SS-10 (N)	SS-11 (N)	
Indice « N » (calibre)	26	39	32 (N)	16 (N)	9	26	17	38	14	21 (N)	37 (N)	
Échantillon (calibre)	SS-12	SS-13 (N)	SS-14 (N)	SS-15 (N)	SS-16 (N)	SS-17	-	-	-	-	-	
Indice « N » (calibre)	50	50 (N)	77 (N)	160 (N)	72 (N)	R	-	-	-	-	-	

*Indices « N » pouvant ne pas être représentatifs des conditions in situ

R - Refus

(N) – Cuillère fendue de calibre N (76 mm de diamètre)

2.3 Conductivité hydraulique in situ

Des essais de conductivité hydraulique par le biais de différentes méthodes ont été réalisés lors des travaux.

Des essais Packer ont été réalisés dans l'ensemble des forages sur l'eau à l'exception des sondages QEEP-074, QEEP-074A ou QEEP-075. Des essais Packer ont également été effectués aux forages QEEP-059 et QEEP-070, tel que détaillé à la section 2.4.1. Des essais Lefranc ont également été réalisés dans les forages terrestres QEEP-063 et QEEP-059, et sont détaillés à la section 2.4.2. Des essais à niveaux descendants et ascendants ont été réalisés dans le puits d'observation installé au forage QEEP-059. Ces essais sont résumés à la section 2.8.1.

2.3.1 Perméabilité Packer

Des essais “Packer” (essais à palier simple ou essais Lugeon à 5 paliers, tel que détaillé au tableau 2.1) ont été effectués à la fin des forages afin de déterminer la perméabilité du roc en place. Un système Packer double à injection d’eau et gonflement à l’azote a été utilisé pour la réalisation des essais.

Les intervalles et fréquences d’essai ont été sélectionnés par les représentants de TCPL et de **exp** sur la base des critères suivants :

- Les essais sont généralement distribués uniformément sur toute la longueur du trou de forage;
- L’emplacement des essais a été choisi en fonction des zones susceptibles d’exhiber de forts débits (perméabilité élevée / RQD faible / faible récupération). Cependant, certains intervalles d’essai ont été sélectionnés dans des zones où une faible perméabilité était anticipée de façon à pouvoir caractériser l’ensemble des horizons explorés. Ceci fut rendu possible par l’examen minutieux des rapports de forage préalablement à l’établissement du programme d’essai;
- Les intervalles d’essai ont été sélectionnés de façon à permettre que les ballons puissent être déployés efficacement et de façon étanche. De façon générale, le premier 5 mètres de roc dans chacun des sondages n’ont pas été testés en raison de la présence de roc de piètre qualité;
- Pour les forages QEEP-077 et QEEP-078, les essais Packer furent limités aux derniers 30 mètres de forage conformément au programme de forage initial.

L’équipement utilisé pour les essais Packer a été fourni par Forage SL et était d’un format adéquat pour la dimension des trous de forages réalisés. Les essais Packer à palier unique ainsi que les essais de type Lugeon à palier multiples ont été réalisés en fonction des conditions prévalant lors des essais.

Les résultats des essais à palier simple, ont été relevés comme valeurs de conductivité hydraulique et peuvent être consultés à l’annexe IV. Les valeurs de conductivité hydraulique (K) ont été calculées de la façon suivante :

$$K = [Q/2\pi HL] [\ln(L/r)]$$

où:

- k - perméabilité
- Q - débit d’eau injecté
- H - pression d’eau (hauteur d’eau) à la section d’essai
- L - Longueur de la section d’essai
- r - Rayon de la section d’essai

Les résultats des essais Lugeon à paliers multiples ont été notés comme valeurs de conductivité hydraulique (k) ainsi que comme valeurs Lugeon. La valeur Lugeon constitue une unité utilisée pour caractériser la perméabilité et l’écoulement à travers un médium rocheux. Elle se définit comme une perte d’eau en litre/minute par mètre de forage à une pression de 1 MPa

Les données relevées selon cette méthode donnent l’évaluation de l’écoulement sous diverses pressions, permettant certaines interprétations en regard des conditions d’écoulement. L’équation pour le calcul des valeurs Lugeon est la suivante :

Valeur Lugeon = $(q / L) \times (P0 / P)$

où:

q - Débit [L/min]

L – Longueur de l'intervalle d'essai [m]

P0 – Pression de référence de 1 MPa [MPa]

P – Pression de l'essai [MPa]

Selon Houlby (Houlby, A. [1976]), une valeur d'un (1) Lugeon constitue une perméabilité typique du roc sain. Par opposition, une valeur de dix (10) Lugeon indique une formation rocheuse poreuse. Une valeur de cent (100) Lugeon est le type de perméabilité observé dans des masses rocheuses très fracturées avec joints modérément ouverts ou dans des masses modérément fracturées avec joints très ouverts.

Les résultats des essais Lugeon ainsi que les valeurs de conductivité hydraulique (k) pour les essais à palier multiples sont présentés à l'annexe IV. L'essai a été réalisé conformément aux prescriptions de la norme française NF P 94-131.

2.3.2 Essais Lefranc

L'essai de perméabilité Lefranc permet de mesurer la conductivité hydraulique d'un horizon de sol. Il peut être réalisé à différentes profondeurs à la base du tubage lors de la réalisation d'un forage.

2.3.2.1 Méthodologie

Tel que spécifié dans la norme CAN/BNQ 2501-135 (2008), l'essai Lefranc consiste à provoquer un écoulement d'eau dans le sol sous une charge hydraulique constante ou variable à partir d'une cavité de forme et de volume définie, appelée lanterne, remplie d'un matériau pulvérulent perméable (sable de silice). Le tubage de forage doit être foncé à la profondeur désirée et lavé au préalable.

Semblable au test "slug" réalisé dans un puits d'observation, la conductivité hydraulique peut être obtenue par la réalisation d'essais à niveau d'eau constant, montant ou descendant.

2.3.2.2 Travaux de terrain

Dans le cadre de la présente étude, un total de trois (3) essais Lefranc ont été réalisés dans deux des sondages terrestres. Le tableau 2.5 qui suit présente le résumé des résultats obtenus. Les essais complets, incluant les notes de calculs, sont joints en annexe IV du présent rapport.

Tableau 2.5: Résultats des essais de perméabilité de type Lefranc

Sondage numéro QEEP-	Type d'essai	Profondeur (point milieu de la section d'essai) m	Conductivité hydraulique calculée (k) m/s
059	Niveau descendant	7.0	2.1×10^{-5}
063	Niveau descendant	10.2	6.3×10^{-8} *
063	Niveau descendant	20.1	2.5×10^{-8} *

*Tel que décrit dans la norme CAN/BNQ 2501-135 (2008), cet essai convient aux sols dont le coefficient de conductivité hydraulique est d'au moins 1×10^{-7} m/s. Ces valeurs étant juste en deçà de la valeur recommandée il convient de les considérer avec discernement.

2.3.3 Puits d'observation

Deux puits d'observation ont été installés dans le forage terrestre QEEP-059. Comme il s'agissait du seul sondage du programme situé sur la rive nord, des essais de conductivité hydraulique ont été effectués dans les dépôts meubles ainsi que dans le socle rocheux. Les données ont été recueillies afin de permettre l'évaluation des infiltrations potentielles au niveau du tunnel et les impacts potentiels sur les matériaux de construction et les opérations.

Un puits d'observation de 50 millimètres de diamètre a été installé à une profondeur de 33,1 mètres pour les essais de perméabilité ainsi que pour l'échantillonnage d'eau du socle rocheux. Un second puits de 20 millimètres de diamètre a été aménagé à une profondeur plus restreinte de 15,8 mètres pour la réalisation d'essais de perméabilité dans une zone de sols meubles présumée plus perméable selon les données de terrain. Des essais de type « Slug tests » y furent réalisés afin de déterminer la conductivité hydraulique in situ. Un schéma d'aménagement des deux puits d'observation est joint à l'annexe IV du présent rapport.

Le résumé des résultats des essais de perméabilité est présenté dans le tableau 2.6 qui suit.

Tableau 2.6: Puits d'observation – Conductivité hydraulique

Sondage numéro QEEP-	Profondeur du puits (m BGS)	Hydraulique Bouwer Rice m/s	Conductivité Hvorslev m/s
059	12.8-15.8	1.23E-8	1.58E-8
	27.1-33.1	1.19E-9	1.29E-9

2.4 Essais géophysiques

Des essais géophysiques de type “Downhole” ont été effectués dans les forages QEEP-072, QEEP-073 et QEEP-059 de façon à obtenir des informations additionnelles quant à la nature et l'orientation

des discontinuités du socle rocheux. Ces essais permettent d'apporter certaines précisions quant à l'orientation des discontinuités, des joints et des failles au sein du roc à des fins de conception.

Les essais géophysiques (Downhole) ont été complétés par le déploiement des sondes suivantes :

- Sonde acoustique
- Sonde optique
- Vitesse acoustique
- Sonde dimensionnelle à trois bras
- Émission gamma naturelle
- Résistivité apparente

Les détails des essais décrits ci-dessus sont présentés dans le rapport final de DGI Survey présenté en annexe Va.

2.5 Données bathymétriques

Les données bathymétriques détaillées ont été obtenues dans le secteur autour du sondage QEEP-072 (localisé approximativement à 75 mètres de l'axe du tunnel) dans le but d'atténuer tout risque potentiel de dommage à la barge et au remorqueur durant les travaux. La profondeur de l'eau à marée basse a été vérifiée et jugée suffisante pour permettre les travaux de forages. Le relevé bathymétrique a été réalisé par Dragage Ocean et Groupe Ocean (GO) pour le compte de **exp**. Le relevé a été effectué le 15 septembre 2014 et celui-ci peut être consulté dans le diagramme intitulé « données bathymétriques QEEP-0722 » en annexe VI.

2.6 Précision et procédures des relevés

Le relevé des sondages terrestres et marins a été réalisé par la firme J.D. Barnes Ltd., un sous contractant de TransCanada sous la supervision directe de Johnston-Vermette. Tous les relevés ont été faits en utilisant un équipement GPS de précision horizontale et verticale de 2,5 et 7 centimètres respectivement.

2.6.1 Sondages terrestres

Le tableau 2.7 présente les coordonnées et les élévations au sol des sondages terrestres tels qu'implantés par la firme J.D. Barnes Ltd. et transmis à **exp** par Johnston-Vermette.

Tableau 2.7: Coordonnées et élévation au sol des sondages terrestres

Sondage numéro QEEP-	Coordonnées				Élévation au sol	Localisation
	Longitude	Latitude	Nord	Est		
059*	- 71.505219	46.719439	5177039.067	308548.289	4.49	Rive nord
063	- 71.463900	46.692160	5173905.621	311610.759	35.26	Rive sud
070	- 71.466140	46.693890	5174103.217	311445.519	32.30	Rive sud

* Tel que mentionné à la section 2, QEEP-059 est la nomenclature utilisée pour l'ensemble du projet au lieu de QEEP-059A (nom de référence réel). Ces coordonnées représentent la localisation de ce dernier.

2.6.2 Sondages sur l'eau

L'équipe d'arpenteurs était présente pour le positionnement de la barge à chaque emplacement de forage. Le positionnement sur place a été fait de façon à ce que la barge s'approche le plus possible des coordonnées voulues. Les trois pattes hydrauliques (spuds) ont ensuite été déployées au fond de la rivière pour stabiliser la barge. Les coordonnées réelles (in situ) ont été notées et l'altitude de référence a ensuite été marquée sur les pattes de la barge. Ces coordonnées sont présentées au tableau 2.8.

Avec ce repère de référence d'élévation, d'autres marques ont été faites sur les pattes de sorte que tout mouvement vertical de la barge au gré des marées pouvait être décelé et quantifié.

Tableau 2.8: Coordonnées et élévations au sol des sondages sur l'eau

Sondage numéro QEEP-	Coordonnées				Élévation au sol	Localisation
	Longitude	Latitude	Nord	Est		
072	- 71.476780	46.701790	5175006.581	310659.675	-7.96	Fleuve Saint-Laurent
073	- 71.480897	46.702085	5175049.280	310345.991	-11.69	Fleuve Saint-Laurent
074	- 71.481074	46.704700	5175340.271	310341.624	-18.74	Fleuve Saint-Laurent
074A	- 71.481246	46.704654	5175335.580	310328.324	-18.49	Fleuve Saint-Laurent
075	- 71.490088	46.708341	5175766.651	309665.397	-10.88	Fleuve Saint-Laurent
075A	- 71.490092	46.708343	5175766.838	309665.108	-11.18	Fleuve Saint-Laurent
076A	- 71.491105	46.711565	5176127.312	309599.017	-13.80	Fleuve Saint-Laurent
077	- 71.496372	46.712552	5176249.725	309199.932	-10.18	Fleuve Saint-Laurent
078	- 71.497615	46.715970	5176632.539	309117.002	-7.35	Fleuve Saint-Laurent

2.7 Détection de gaz

La décomposition de la matière organique ainsi que d'autres processus se produisant dans les roches sédimentaires peuvent provoquer des émissions de gaz dont la pression de confinement au sein de la roche peut être libérée lors de la progression des forages.

Tel que recommandé par le représentant de TCPL, des tests ont été effectués dans l'espace confiné du forage au taux de un (1) essai par équipe de travail lors du forage dans le roc. Les concentrations relatives de quatre (4) types de gaz indicateurs ont été mesurées; soit : CH₄, CO, H₂S et O₂. La procédure pour ces tests est la suivante:

1. Lors de l'arrêt du forage ou d'une pause, nettoyer le dessus du train de tubage ou du tube PVC.
2. Prendre un sac de plastique renforcé et le placer au-dessus du train de tubage ou du tube PVC.
3. Sceller le sac sur le tubage au moyen d'un ruban collant.
4. Attendre 30-40 minutes pour laisser le temps aux gaz de s'accumuler.
5. Pratiquer une petite ouverture dans le sac et y insérer rapidement l'embout du détecteur.
6. Noter le niveau maximal de concentration des gaz.
7. La sonde peut être abaissée juste au-dessus de l'interface de l'eau (si possible), afin de mieux mesurer les gaz plus lourds.

Le sommaire des essais de détection des gaz est présenté dans le tableau 2.9 qui suit.

Tableau 2.9: Sommaire des essais de détection des gaz

Sondage QEEP-	Date (2014)	Début du test	Durée du test (min)	Profondeur du forage au moment de l'essai (m)	CH ₄ (LEL%)	CO (ppm)	*H ₂ S (ppm)	O ₂ (% Vol)	Commentaires
075A	07-Sept	6:55 PM	45	88.96	0	0	0	22.9	
	09-Sept	7:30 AM	46	96.77	0	0	0	20.9	
072	16-Sept	7:25 PM	30	13.40	0	0	0	18.8	
	18-Sept	7:05 AM	60	42.24	0	0	0	20.9	
	19-Sept	5:25 AM	40	64.50	0	0	0	20.9	
		6:00 PM	57	80.25	0	0	0	20.9	
074	26-Sept	8:00 PM	50	28.90	0	0	0	20.9	
	28-Sept	7:45 AM	60	73.19	0	0	0	20.9	
074A	06-Oct	12:25 PM	40	17.12	17	0	0	20.1	
		4:00 PM	35	27.12	0	0	0	20.9	
		7:05 PM	40	34.37	0	0	0	21.9	
	07-Oct	8:30 AM	30	49.15	0	0	0	20.9	
059	10-Oct	7:45 AM	15	27.89	0	0	0	21.0	
	15-Oct	12:00 PM	30	49.99	6	16	0	20.9	
		1:20 PM	30	50.71	0	58	0	22.6	
	16-Oct	10:50 AM	30	60.00	4	372	0	20.9	
	19-Oct	9:00 AM	30	61.34	0	6	0	19.4	
	28-Oct	12:00 PM	30	81.17	0	137	0	20.9	Surface
		12:00 PM	30	81.17	5	> 500	0	20.1	Niveau de l'eau
	29-Oct	8:00 AM	30	81.17	0	0	0	20.9	Surface
8:00 AM		30	81.17	5	66	0	20.1	Niveau de l'eau	
070	31-Mar	10:30 AM	30	92	34	90	0	20.9	
		10:40 AM	30	92	0	0	0	20.9	
		-	30	96	0	26	0	20.9	
		-	30	100	0	0	0	20.9	
		-	30	105	0	0	0	20.9	

* Alors que le CH₄ et le CO sont plus légers que l'air (et vont donc s'élever), H₂S est plus lourd que l'air, et s'accumulera donc au niveau de l'eau. Les tests de l'espace libre n'ont pas été menés profondément dans les trous de forage (à l'exception de QEEP-059). Une lecture de 0 ne signifie donc pas nécessairement qu'aucun H₂S n'était présent.

3 Essais de laboratoire

3.1 Essais sur les sols

Les essais réalisés sur les échantillons de sols sont décrits ci-dessous.

3.1.1 Analyses granulométriques

En tout, huit (8) échantillons de sols provenant des forages terrestres QEEP-059 et QEEP-063 ont été acheminés au laboratoire afin de réaliser une analyse granulométrique. Le tableau 3.1 résume les résultats, tandis que les rapports d'analyses complets se trouvent à l'annexe II a2.

Tableau 3.1: Résumé des analyses granulométriques

Forage QEEP-	Échantillon	Profondeur (m)	Gravier (%)	Sable (%)	Silt et argile (%)	Classification USCS
059	SS-3	2.3 à 2.5	12	51	37	SM
	SS-10	9.1 à 9.8	0	3	97	-
	SS-12B	12.3 à 12.8	1	76	23	SM
	SS-13	14.0 à 14.3	11	65	24	SM
063	SS-3	4.3 à 4.9	1	86	13	SM
	SS-6	8.8 à 9.4	12	53	35	SM
	DC-11	14.8 à 15.0	5	82	13	SM
	DC-14	18.0 à 19.2	2	61	37	SM

3.1.2 Limites d'Atterberg

En raison des horizons argileux interceptés au droit du forage QEEP-073 à environ 18,8 mètres, les limites d'Atterberg ont été réalisées sur deux (2) échantillons.

Selon la classification unifiée (USCS), les résultats des essais indiquent que les échantillons correspondent à une argile de faible plasticité, Voir le tableau 3.2.

Tableau 3.2: Résultats des limites d'Atterberg

Forage QEEP-	Échantillon	Profondeur (m)	Limite liquide (%)	Limite plastique (%)	Indice de plasticité (%)	Classification USCS
073	CR-15a	18.74 To 18.88	39	19	20	CL
	CR-15b	18.88 To 18.93	26	15	11	CL

3.2 Essais sur les carottes de roc

3.2.1 Général

La caractérisation des carottes donne des informations importantes au sujet des propriétés géotechniques du socle rocheux, par exemple la fréquence et l'orientation des fissures. Il s'agit d'une première étape pour déterminer les spécifications géotechniques requises lors de la conception d'un tunnel dans un socle rocheux. Une deuxième étape consiste à déterminer la résistance et le comportement du roc sain au moyen d'essais de laboratoire. Plusieurs paramètres géotechniques sont essentiels à la conception du tunnel, dont l'estimation du taux de pénétration des tunneliers (TBM).

Quelques 691 mètres de carottes de roc de calibre NQ, NQ3 et HQ3 provenant de 11 forages localisés le long du tracé ont été caractérisés au laboratoire de **exp** de Montréal. La caractérisation géologique et géotechnique des carottes a été réalisée afin de compléter l'étude de faisabilité du tracé traversant le fleuve Saint-Laurent.

Quelques 374 échantillons de roc ont été sélectionnés et acheminés à différents laboratoires afin de réaliser neuf essais complémentaires. Chacun des laboratoires externes a été audité par **exp** afin de vérifier la conformité aux normes de l'industrie des méthodes d'essai, la qualification du personnel, la conformité des équipements, ainsi que la validité des certificats d'étalonnage. Les rapports d'audit ont été envoyés à Johnston-Vermette (voir rapports RAP-DRU282578, RAP-DRU282579, et RAP-DRU282462).

3.2.2 Description géomécanique

Toutes les carottes de roc reçues du port de Québec étaient en bon état à leur arrivée au laboratoire de **exp** situé à Montréal. Les carottes ont été identifiées et entreposées à la température ambiante. Seules les carottes emballées individuellement au chantier (voir la section 2.2.2 pour plus de détails) ont été curées en chambre humide, afin de simuler les conditions *in situ*. Les indices RCR (*Rock Core Recovery*) Ann RQD (*Rock Quality Designation*) ont été déterminés, puis les échantillons ont été photographiés à l'état sec et humide. Toutes les informations géologiques pertinentes ont été consignées : nature du roc, couleur, texture, taille des grains, météorisation, litage, réseau de fractures, etc.

Afin d'évaluer la qualité du roc, les indices Q' (*Tunnelling Quality Index*) et RMR (*Rock Mass Rating* de Bieniawski, 1984) ont également été déterminés. Ces classifications intègrent des paramètres

géologiques, géométriques et de conception dans le but d'obtenir la qualité du roc en fonction de l'orientation, essentiel lors de la conception préliminaire.

Le plan méthodologique comprenant tous les essais de laboratoire avait d'abord été recommandé par TCPL. Ensuite, **exp** a suivi toutes les procédures établies, du transport à l'entreposage des échantillons, en passant par la procédure de caractérisation des carottes et le format des rapports.

La procédure de caractérisation a été respectée pour toutes les carottes. Cependant, certains facteurs peuvent engendrer une variabilité dans les résultats. Ces facteurs sont : diamètre des carottes, méthode de carottage (triple paroi, diamètre du tubage) et la disponibilité des photographies des carottes, prises avant le transport des échantillons. La fragilité, la friabilité et la faible résistance du roc peuvent aussi avoir influencé le réseau de fissuration. Toutefois, l'examen attentif des fissures permet généralement d'en établir la cause et de déterminer s'il s'agit de fractures naturelles ou mécaniques. Le nombre de fractures identifié comme mécaniques dépassait pour la majorité des forages le nombre de fractures identifié naturelles. Pour les forages où les photos de chantier n'étaient pas disponibles, il est possible que certaines fractures identifiées naturelles en laboratoire puissent en fait représenter des fractures mécaniques post-forage.

3.2.3 Sélection des échantillons

La sélection des échantillons a été réalisée conjointement avec un représentant de **exp** et de TCPL, de même que le nombre d'échantillons requis pour les essais de caractérisation du roc. Les essais requis pour un projet de tunnel ont été réalisés sur des échantillons provenant de chacun des forages. La liste des caractéristiques recherchées du roc, les normes en vigueur, le nombre d'essais, de même que les sites où les essais ont été réalisés, sont résumés dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Parmi les échantillons de roc, deux échantillons de sédiment fin ont été récupérés afin de réaliser l'essai des limites d'Atterberg. Les résultats peuvent être consultés à l'annexe III a1.

Tableau 3.3: Résumé du programme d'essais sur les échantillons de roc

Essai de laboratoire	Normes	Nombre d'essais	Caractéristiques mesurées	Laboratoire
Essai de résistance à charge ponctuelle (Point Load Test)	ASTM D5731-08	129	Indice de résistance à charge ponctuelle	exp - Montreal École Polytechnique de Montréal
Essai de résistance à la compression uniaxiale	ASTM D7072-10	38	- résistance à la compression uniaxiale	exp - Montreal
Essai de résistance à la compression uniaxiale et module d'Young	ASTM D7072-10	14	- Résistance à la compression uniaxiale - Module d'élasticité - Coefficient de Poisson - Masse volumique apparente	Université de Sherbrooke
Essai de résistance à la traction par écrasement latéral (essai brésilien)	ASTM D3967-08	53	- résistance à la traction par écrasement latéral - Masse volumique apparente	exp - Montreal
Essai d'abrasion CERCHAR	ASTM D7625-10	27	- Abrasivité des roches	École Polytechnique de Montréal
Essai de résistance à l'usure (SLAKE)	ASTM D4644-08	26	- Essai de résistance à l'usure (SLAKE)	École Polytechnique de Montréal

Essai de laboratoire	Normes	Nombre d'essais	Caractéristiques mesurées	Laboratoire
Essai de pénétration du roc	CSM	26	- Échelle de pénétration du roc (<i>Punch Penetration Index</i>)	Colorado School of Mines
Essai de diffraction (rayons X)		29	- Minéralogie	Université du Québec à Montréal UQAM
Essai de pétrographie		32	- Description minéralogique	VanPetro - Vancouver Petrographics
TOTAL		374		
Le total des essais correspond au nombre d'échantillons acheminés à chacun des laboratoires. En raison de l'état non conforme de l'échantillon à la réception (ex. : bris, etc.), certains essais n'ont conduit à aucun résultat.				

Un total de 374 échantillons de carottes de roc a été acheminé dans les différents laboratoires aux fins d'analyses. En raison de la fragilité des échantillons, certains essais n'ont cependant pas pu être réalisés en tout ou en partie. Certains échantillons se sont notamment brisés durant les manipulations de laboratoire, ou encore durant la réalisation de l'essai. Les descriptions sommaires des essais ainsi que les tableaux résumés des résultats sont présentés dans les sections suivantes. Les rapports d'essais complets, incluant les photographies, sont présentés en annexe II et III du volume II du présent rapport.

3.2.3.1 Essai de résistance à charge ponctuelle (Point Load Test)

L'essai de résistance à charge ponctuelle (PLT) sert à classer le roc en fonction de sa résistance. Le résultat de l'essai est aussi corrélé à d'autres paramètres, comme la résistance à la compression uniaxiale et non confinée, de même que la résistance à la traction. L'essai est habituellement réalisé au chantier, sur une carotte de roc, ou encore un bloc récupérable. Pour ce projet, les essais ont été réalisés au laboratoire uniquement sur des carottes de roc, conservées en conditions humides. Selon la géologie structurale du site (pendage, foliation) ou de l'anisotropie du matériau, les essais ont été effectués dans la direction axiale et latérale. **Exp** a suivi les procédures recommandées par le représentant de TCPL. Bien que généralement équivalente, certains points de la méthode variaient de celles recommandées par l'ISRM « Suggested Methods for Determining Point Load Strength » (Franklin et al., 1985). Ces procédures ont servi à déterminer la direction du chargement, soit axiale ou latérale. La direction du chargement a également été choisie en fonction de sa résistance maximale. La presse se compose d'une cellule de charge qui enregistre la force nécessaire pour briser l'échantillon, dont la distance entre les deux plateaux est mesurée. La charge est transmise à l'échantillon au moyen de deux plaques hémisphériques. La force appliquée à la rupture et la distance entre les pointes sont utilisées dans le calcul pour trouver l'indice de résistance à charge ponctuelle. Une presse de marque « Rocktest Enerpac », modèle JAI-73, d'une capacité de 6,7 tonnes métriques et de course maximale de 76,2 mm machine a été utilisée dans le laboratoire de **exp**. Le plan détaillé de la presse, de même que les procédures utilisées par l'École polytechnique pour effectuer l'essai peuvent être consultées à l'annexe 3 b1. Le tableau 3.4 ci-dessous résume les résultats obtenus.

Tableau 3.4: Résumé des résultats – Essai de résistance à charge ponctuelle (Point Load Tests)

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Type d'essai (D or A)	Charge (Newton)	* Indice de correction (I50)	Résistance compression établie (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Litage ou foliation (°)
Échantillon	Profondeur (m)										
	de	à									
QEEP-063											
MO-6657	27.35	27.42	Unw	47.01	D	560	0.233	3.3	I	Turbidite cycle- SST	62°
QEEP-070											
MO-6663	20.00	20.05	Unw	47.26	D	10826	4.71	65.9	V-A	Turbidite cycle- SST	15°
MO-6665	20.22	20.26	Unw	47.11	D	8532	3.73	52.2	V-B	Turbidite cycle- SST	15°
MO-6670	36.18	36.23	Unw	47.09	D	834	0.30	5.1	I-B	Turbidite cycle	40°
MO-6672	36.50	36.56	Unw	47.18	D	853	0.372	5.2	V-A	Turbidite cycle	38°
MO-6676	48.85	48.90	Unw	47.00	D	531	0.233	3.3	V-A	Turbidite cycle	50°
MO-6678	49.42	49.50	Unw	47.36	D	891	0.386	5.4	V-A	Turbidite cycle- MDST	45°
MO-6679	50.77	50.84	Unw	47.17	A	1251	0.551	7.7	V-A	Turbidite cycle	60°
MO-6682	51.25	51.31	Unw	47.14	A	4133	1.571	22.0	V-A	Turbidite cycle- SST	60°
MO-6688	65.20	65.26	Unw	47.00	D	588	0.258	3.6	I-E	Turbidite cycle + vaine	7°
MO-6690	65.96	66.01	Unw	46.91	D	3602	1.586	22.2	I-B	Turbidite cycle - folded	7°
MO-6695	76.36	76.41	Unw	47.38	D	360	0.156	2.2	V-B	Turbidite cycle	38°
MO-6697	77.23	77.28	Unw	47.39	D	2635	1.142	16.0	V-A	Turbidite cycle + vaine	45°
MO-6698	81.63	81.68	Unw	47.18	A	3640	1.417	19.8	V-A	Turbidite cycle	62°
MO-6700	82.05	82.10	Unw	47.24	A	4780	2.034	28.5	I-E	Turbidite cycle	55°
MO-6707	91.23	91.30	Unw	47.31	D	1517	0.659	9.2	V-B	Turbidite cycle	43°
MO-6710	92.47	92.54	Unw	47.26	D	1270	0.553	7.7	V-B	Turbidite cycle- SST	42°
MO-6712	92.77	92.83	Unw	47.20	D	512	0.222	3.1	V-B	Turbidite cycle	40°
MO-6716	101.48	101.55	Unw	47.05	D	474	0.208	2.9	V-B	Turbidite cycle	40°

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Type d'essai (D or A)	Charge (Newton)	* Indice de correction (150)	Résistance compression établie (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Litage ou foliation (°)
Échantillon	Profondeur (m)										
	de	à									
MO-6718	101.86	101.91	Unw	47.25	A	5821	2.299	32.2	I-E	Turbidite cycle- SST	60°
MO-6722	108.51	108.56	Unw	47.21	A	4683	1.900	26.6	V-A	Turbidite cycle- SST	57°
MO-6724	108.75	108.80	Unw	47.44	A	6181	2.408	33.7	V-A	Turbidite cycle- SST	57°
QEEP-072											
** MO-7058	9.49	9.57	W	60.77	A	8400	2.04	28,6	V	Indurated Black shale	*
** MO-7060	9.76	9.84	W	60.63	A	4620	1,12	15,68	V	Indurated Black shale	*
MO-7062	9.96	10.00	Unw	60.87	A	8911	2.835	39.7	V-A	Indurated Black shale	75°
MO-7064	10.20	10.25	Unw	60.92	A	10352	3.056	42.8	V-A	Indurated Black shale	75-80°
MO-7067	20.65	20.71	W	60.65	D	2541	0.763	10.7	V-B	Foliated Flysich	10-30°
MO-7069	20.90	20.99	W	60.70	D	10276	3.073	43.0	V-A	SST- Flysich Matrix	10-30°
MO-7079	43.26	43.34	Unw	60.50	D	1024	0.308	4.3	I-B	Foliated Flysich	45-50°
MO-7081	43.50	43.57	Unw	60.47	D	1953	0.587	8.2	I-B	Foliated Flysich	30°
MO-7083	48.79	48.88	W	60.60	D	---	---	---	F	Foliated Flysich	30-40°
MO-7085	49.02	49.09	W	60.64	D	---	---	---	G	Foliated Flysich	40°
MO-7088	59.00	59.09	W	60.36	D	3072	0.026	13.0	I-B	Tectonic Breccia	5-15°
MO-7090	59.25	59.35	W	60.31	D	1270	0.384	5.4	V-B	Tectonic Breccia	45°
** MO-7094	63.10	63.20	W	60.50	A	1460	0.390	5.5	I	Tectonic Breccia	60°
** MO-7096	63.41	63.50	W	60.50	D	2630	0.780	10.9	V	Tectonic Breccia	30°
MO-7101	68.55	68.63	Unw	60.27	D	929	0.281	3.9	I-B	Foliated Flysich	45°
MO-7104	79.28	79.34	Unw	60.24	D	1555	0.470	6.6	I-E	Foliated Flysich	45°
QEEP-073											
MO-6932	25.94	26.04	Unw	60.69	D	1270	0.380	5.3	I-B	Foliated Flysich	10-15°
MO-6934	26.40	26.45	Unw	60.67	A	---	---	---	G	Foliated Flysich	60-65°
MO-6937	33.43	33.51	W	60.75	D	---	---	---	F	Foliated Flysich	30°
MO-6939	33.66	33.74	W	60.79	D	---	---	---	G	Foliated Flysich	15°

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Type d'essai (D or A)	Charge (Newton)	* Indice de correction (I50)	Résistance compression établie (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Litage ou foliation (°)
Échantillon	Profondeur (m)										
	de	à									
** MO-6942 (1)	39.68	39.77	W	---	---	---	---	---	---	Foliated Flysch	---
** MO-6944 (2)	39.93	40.02	W	60.50	D	2800	1.01	14.1	V	Foliated Flysch	0°
MO-6947	45.27	45.36	Unw	60.49	D	1100	0.331	4.6	V-B	Foliated Flysch	20°
MO-6949	45.50	45.59	Unw	60.54	D	---	---	---	F	Foliated Flysch	20-40°
MO-6953	58.59	58.73	W	60.83	D	209	0.062	0.9	V-A	Foliated Flysch	30-40°
** MO-6955	64.90	65.00	W	60.90	A	1112	3.140	43.96	V	SST Flysch matrix	*
** MO-6957	65.20	65.30	W	60.85	A	1310	3.42	47.88	V	SST Flysch matrix	*
MO-6959	69.60	69.72	Unw	60.84	A	702	0.188	2.6	I-E	Foliated Flysch	65-70°
MO-6960	73.10	73.29	Unw	60.66	D	436	0.131	1.8	I-B	Foliated Flysch	35°
MO-6963	73.51	73.59	Unw	60.98	D	664	0.107	2.8	V-B	Foliated Flysch	20-25°
MO-6965	74.05	74.12	Unw	60.88	D	---	---	---	F	Foliated Flysch	30-45°
QEEP-074											
MO-7146	20.52	20.59	W	60.78	A	2522	1.337	18.7	V-A	Turbidite cycle- SST	50°
MO-7148	21.18	21.35	W	60.69	A	1631	0.620	8.7	V-B	Turbidite cycle- SST	52°
MO-7153	36.64	36.68	Unw	60.41	A	4399	1.571	22.0	V-A	Turbidite cycle	65°
MO-7155	36.90	36.94	Unw	60.49	A	2465	0.681	12.1	V-A	Turbidite cycle	65°
MO-7160	50.11	50.13	W	60.40	A	1346	0.795	11.13	V-A	Turbidite cycle- SST	62°
MO-7162	52.14	52.22	W	60.44	D	664	0.200	2.8	I-B	Folded Turbidite	40-45°
MO-7165	62.82	62.84	Unw	60.58	A	1858	0.927	13.0	V-A	Turbidite cycle	70°
QEEP-074A											
MO-7168	55.13	55.23	Unw	60.64	A	1915	1.167	16.3	V-A	SST- Foliated Turbidite	70°
MO-7171	55.84	55.93	Unw	60.61	D	---	---	---	F	Foliated Turbidite	20-40°
MO-7174	65.63	65.72	Unw	60.38	D	683	0.206	2.9	V-B	Foliated Turbidite	Mult.Fol.
MO-7175	66.00	66.09	Unw	60.41	A	---	---	---	F	Foliated Turbidite	70°
MO-7177	72.99	73.01	Unw	60.32	A	948	0.528	7.4	V-A	Foliated Turbidite	62°
MO-7178	72.70	72.78	W	60.45	D	---	---	---	G	Foliated Turbidite	20-30°

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Type d'essai (D or A)	Charge (Newton)	* Indice de correction (150)	Résistance compression établie (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Litage ou foliation (°)
Échantillon	Profondeur (m)										
	de	à									
MO-7180	72.94	72.97	W	60.71	A	2787	1.182	16.6	V-A	Foliated Turbidite	60°
QEEP-075A											
MO-7306	58.29	58.35	Unw	44.57	D	284	0.135	1.9	I-B	Turbidite cycle	30°
MO-7308	59.48	59.52	Unw	44.61	D	683	0.324	4.5	I-B	Turbidite cycle	30°
MO-7314	75.07	75.13	Unw	44.73	D	133	0.063	0.9	I-B	Turbidite cycle	35°
MO-7316	76.82	76.88	Unw	44.56	D	872	0.415	5.8	I-B	Turbidite cycle	40-45°
MO-7319	82.00	82.08	Unw	44.66	D	1346	0.638	8.9	V-B	Turbidite cycle	25°
MO-7321	82.47	82.56	Unw	44.45	D	2143	1.022	14.3	I-B	Turbidite cycle- SST	25°
MO-7323	84.60	84.65	Unw	44.71	D	1858	0.879	12.3	I-E	Turbidite cycle	25°
MO-7326	85.58	85.65	Unw	44.55	D	76	0.036	0.5	V-B	Turbidite cycle	32°
MO-7329	91.08	91.17	Unw	44.51	D	341	0.163	2.3	I-B	Turbidite cycle	20°
MO-7331	91.70	91.76	Unw	44.59	D	---	---	---	G	Turbidite cycle	20°
QEEP-076A											
MO-7367	53.07	53.10	Unw	44.57	A	1308	0.694	9.71	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7369	54.07	54.09	Unw	44.67	A	1100	0.688	9.63	V-A	Turbidite cycle	72°
MO-7373	60.73	60.76	Unw	44.75	A	5157	2.634	36.9	V-A	Turbidite cycle- SST	45°
MO-7375	61.31	61.34	Unw	44.66	A	2749	1.532	21.5	V-A	Turbidite cycle- SST	45°
MO-7378	67.01	67.04	Unw	44.79	A	3356	2.113	29.6	V-A	Turbidite cycle	55°
MO-7381	67.41	67.44	Unw	44.76	A	2465	1.644	23.0	V-A	Turbidite cycle	50°
MO-7383	69.58	69.61	Unw	44.80	A	3242	2.091	29.3	I-C	Turbidite cycle	50°
MO-7385	69.85	69.90	Unw	44.59	D	398	0.189	2.7	I-B	Turbidite cycle	40°
MO-7391	79.41	79.43	Unw	44.76	A	1877	1.188	16.6	V-A	Turbidite cycle	65°
MO-7393	79.71	79.74	Unw	44.49	A	1441	0.809	11.3	V-A	Turbidite cycle	60°
QEEP-077											
MO-6742	19.10	19.13	Unw	47.67	A	2484	1.240	17.4	V-A	Turbidite cycle	72°
MO-6745	25.67	25.70	Unw	47.53	A	3223	1.653	23.1	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6747	26.25	26.28	Unw	47.41	A	3223	1.652	23.1	V-A	Turbidite cycle	69°
MO-6749	30.47	30.51	Unw	47.68	A	1706	0.780	10.9	V-A	Turbidite cycle	72°

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Type d'essai (D or A)	Charge (Newton)	* Indice de correction (I50)	Résistance compression établie (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Litage ou foliation (°)
Échantillon	Profondeur (m)										
	de	à									
MO-6752	38.76	38.79	Unw	47.03	A	1763	0.819	11.5	V-A	Turbidite cycle	71°
MO-6754	39.25	39.29	Unw	47.80	A	2541	1.092	15.3	V-A	Turbidite cycle	71°
MO-6759	40.36	40.38	Unw	47.56	A	1820	1.112	15.6	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6762	40.89	40.93	Unw	47.51	A	3792	1.668	23.4	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6768	57.77	57.79	Unw	47.60	A	3147	1.900	27.3	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6770	57.97	58.01	Unw	47.49	A	6257	2.524	35.3	V-A	Turbidite cycle- SST	70°
MO-6774	59.72	59.77	Unw	47.40	A	8627	3.150	44.1	I-E	Turbidite cycle- SST	70°
MO-6777	59.97	60.01	Unw	47.43	A	8968	3.906	54.7	V-A	Turbidite cycle- SST	70°
MO-6781	73.70	73.73	Unw	47.46	A	5347	3.162	44.3	V-A	Turbidite cycle- SST	70°
MO-6784	74.17	74.21	Unw	47.54	A	4702	1.984	27.8	V-A	Turbidite cycle	60°
MO-6787	77.73	77.75	Unw	47.58	A	3546	2.340	32.8	V-A	Turbidite cycle	64°
QEEP-078											
MO-6801	36.00	36.03	Unw	47.30	A	3072	1.791	25.1	V-A	Turbidite cycle	68°
MO-6803	36.20	36.24	Unw	47.23	A	3102	1.332	18.7	V-A	Turbidite cycle	69°
MO-6807	42.14	42.18	Unw	47.33	A	2598	1.032	14.5	V-A	Turbidite cycle	62°
MO-6809	42.56	42.59	Unw	47.12	A	739	0.354	5.0	V-A	Turbidite cycle	62°
MO-6814	54.08	54.11	Unw	47.29	A	2351	1.223	17.1	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6816	54.51	54.53	Unw	47.28	A	739	0.437	6.1	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6817	58.49	58.52	Unw	47.37	A	3602	1.953	27.3	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6820	61.47	61.50	Unw	47.54	A	2067	1.139	16.0	V-A	Turbidite cycle	72°
MO-6822	61.70	61.74	Unw	47.56	A	2048	0.866	12.1	V-A	Turbidite cycle	71°
MO-6823	64.00	64.04	Unw	47.30	A	2180	0.937	13.1	V-A	Turbidite cycle	72°
MO-6826	77.73	77.75	Unw	47.66	A	4152	2.622	37.7	V-A	Turbidite cycle- SST	71°
MO-6829	78.29	78.32	Unw	47.46	A	3053	1.445	20.2	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-6833	79.16	79.19	Unw	47.47	A	4835	2.570	36.0	V-A	Turbidite cycle	72°
MO-6834	79.25	79.28	Unw	47.54	A	3337	1.545	21.6	V-A	Turbidite cycle	71°
MO-6836	79.41	79.43	Unw	47.42	A	2787	1.982	27.8	V-A	Turbidite cycle	73°

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Type d'essai (D or A)	Charge (Newton)	* Indice de correction (I50)	Résistance compression établie (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Litage ou foliation (°)
Échantillon	Profondeur (m)										
	de	à									
QEEP-059											
MO-7268	23.07	23.09	Unw	60.77	A	1839	0.978	13.7	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7270	23.60	23.62	W	60.80	A	1877	1.042	14.6	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7272	31.16	31.18	W	60.66	A	2180	1.167	16.3	I-E	Turbidite cycle	65°
MO-7274	31.36	31.38	W	60.70	A	1062	0.562	7.9	V-A	Turbidite cycle- MDST	65°
MO-7279	45.50	45.53	W	60.58	A	6825	3.046	42.7	V-A	Turbidite cycle- SST	70°
MO-7281	45.70	45.72	W	60.61	A	1289	0.760	10.6	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7287	58.57	58.59	W	60.72	A	4039	2.245	31.4	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7289	58.84	58.86	W	60.80	A	2958	1.640	23.0	V-A	Turbidite cycle	75°
MO-7294	70.04	70.06	W	60.77	A	1820	1.020	14.3	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7296	70.28	70.30	W	60.80	A	1574	0.963	13.5	V-A	Turbidite cycle	70°
MO-7300	77.34	77.37	W	60.69	A	7698	3.432	48.0	V-A	Turbidite cycle- SST	70°
MO-7302	77.52	77.55	W	60.74	A	4133	1.830	25.6	V-A	Turbidite cycle	70°

L'ordre des forages est présenté selon leur position géographique dans l'axe du tracé proposé du tunnel, du sud vers le nord.

* Le Is (50) correspond à la charge ponctuelle corrigée, calculée à l'aide de la norme ASTM D5731-08. La résistance à la compression estimée est obtenue en multipliant le Is (50) par le facteur recommandé par TCPL pour ce type de roc, soit 14.

** Essai réalisé à l'École Polytechnique

En raison de l'anisotropie du roc et de la fragilité des carottes, la différence de la résistance pour une paire d'échantillons excède souvent 20 %. Tel que recommandé par TCPL, souvent un troisième essai a été fait afin d'obtenir un intervalle acceptable. Les résultats apparaissant dans le tableau proviennent des paires qui présentent les intervalles les plus faibles.

(W)= échantillon emballé (Unw)= échantillon non emballé

Type de bris: (V)=Valide, (I)= Invalide

A - La fissure traverse l'échantillon de haut en bas et intercepte les plateaux

B - La fissure suit un plan de faiblesse

C - La fissure provient d'une fissure préexistante

D - La fissure provient d'une fissure préexistante, mais traverse l'échantillon de haut en bas et intercepte les plateaux

E - La fissure n'intercepte pas les deux plateaux

F - L'échantillon a été brisé durant la préparation

G - L'échantillon a été brisé en deçà du seuil d'enregistrement de la presse.

La foliation (°) se réfère à l'angle alpha, formé entre l'axe de la carotte et le plan de la couche. * Si aucune couche n'a pu être déterminée.

(1) L'échantillon était brisé à la réception

(2) L'essai a été réalisé sur un bloc irrégulier

3.2.3.2 Essai de résistance à la compression uniaxiale (UCS) et (UCS) avec module élastique

La résistance à la compression est l'un des paramètres de résistance le plus courant, et aussi le plus commun pour évaluer la forabilité du socle rocheux. Des carottes affichant un ratio hauteur et diamètre de 2 et plus est requis (un facteur de correction peu éventuellement être nécessaire). Une presse de type MATEST, Modèle YIM2000NNB, avec une capacité de 2000 kN et une pression maximale de 618,17 bars a été utilisée dans le laboratoire de **exp**, joint à un système d'acquisition de données. La résistance à la compression est calculée en divisant la charge maximale (rupture) par la section transversale de l'échantillon.

Le module d'élasticité, ou module d'Young, qui décrit la relation entre la contrainte et la déformation, a été déterminé pour certains échantillons. La méthode d'essai permet d'évaluer la compétence du roc. Pour ce faire, l'échantillon a subi de trois à cinq cycles de chargement correspondant à 40 % de sa résistance en compression. À partir de la rigidité et de la densité apparente, le coefficient de Poisson dynamique a été déterminé. Cependant, certains facteurs, comme l'anisotropie du roc, peuvent influencer les résultats. Dans le cadre de cette étude, la fragilité de la roche et la mauvaise qualité du roc ont joué un rôle certain dans l'obtention de résultats tangibles. La variabilité des données existantes a rendu l'essai difficile à réaliser.

Le laboratoire de mécanique des roches de l'Université de Sherbrooke a réalisé les essais avec une cellule de charge de marque MTS, modèle 315.02, série 115, avec une capacité de 2 679 kN et une presse de marque Tovey, modèle SW20-50K-B avec une capacité de 50 000 lb. Les résultats détaillés se trouvent dans les annexes III b2 & b3. Le tableau 3.6 résume les résultats.

Pour ce projet, l'essai a été réalisé sur des carottes de différents diamètres, à l'état humide lorsque celles-ci étaient emballées (W), et pratiquement sèches lorsque celles-ci n'étaient pas emballées (Unw).

Les résumés des résultats des essais de résistance à la compression (**exp**) et de résistance à la compression avec le module de Young (Université de Sherbrooke) apparaissent respectivement dans les tableaux 3.5 et 3.6 ci-dessous.

Tableau 3.5: Résumé des résultats des essais de résistance à la compression uniaxiale

Localisation			Cure (W or Unw)	D (mm)	L (mm)	Masse (kg)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Structure (B or F)
Échantillon No.	Profondeur (m)										
	de	à									
QEEP-070											
MO-6664	20.10	20.21	Unw	47.12	107.94	0.493	2619	36.3	SE	Lamin. SST	15°
MO-6671	36.28	36.38	Unw	47.17	98.48	0.445	2586	11.6	ME	Folded turbidite	40°
MO-6677	48.90	49.01	Unw	46.96	106.34	0.483	2622	35.6	SE	Turbidite cycle-SST	50°
MO-6689	65.50	65.60	Unw	47.12	98.11	0.445	2601	15.4	ME	SST Flysch	7°
MO-6696	76.46	76.57	Unw	47.09	106.28	0.493	2614	7.8	C-D	SST Flysch	40°

Localisation			Cure (W or Unw)	D (mm)	L (mm)	Masse (kg)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Structure (B or F)
Échantillon No.	Profondeur (m)										
	de	à									
MO-6711	92.54	92.64	Unw	47.16	96.68	0.443	2623	5.1	C-D	Turbidite cycle-MST	40°
MO-6723	108.59	108.70	Unw	47.22	109.36	0.503	2626	57.7	MS C	Lamin. SST	57°
QEEP-072											
MO-7063	10.06	10.20	Unw	60.92	140.26	0.988	2417	74.4	ME	Indurated blk shale	75°
MO-7068	20.72	20.85	W	60.82	134.56	0.986	2522	---	B-C	Fol. Argill. Flysch	10-30°
MO-7080	43.35	43.49	Unw	60.60	143.74	1.061	2559	---	B-C	Fol. Argill. Flysch	30°
MO-7084	48.88	49.01	W	60.66	130.62	0.935	2477	---	B-C	Fol. Argill. Flysch	30-40°
MO-7089	59.10	59.25	W	60.38	149.81	1.120	2611	4.5	SS C-D	Fol. Argill. Flysch	45°
QEEP-073											
MO-6933	26.04	26.17	W	61.18	134.93	1.010	2546	---	B-C	Fol. Argill. Flysch	65°
MO-6938	33.51	33.64	W	61.24	134.67	1.016	2561	---	B-C	Fol. Argill. Flysch	30-40°
MO-6946	49.80	49.93	Unw	---	---	---	---	---	A	Fol. Argill. Flysch	20°
MO-6948	45.36	45.50	Unw	60.40	138.18	1.043	2634	5.4	SS C	Fol. Argill. Flysch	20-40°
MO-6964	73.92	74.05	Unw	---	---	---	---	---	A	Fol. Argill. Flysch	30-45°
QEEP-074											
MO-7147	21.04	21.18	W	---	---	---	---	---	A	Fol. Argill. Flysch	50°
MO-7154	36.72	36.86	Unw	60.37	141.01	1.040	2574	25.9	MS	Turbidite cycle	65°
QEEP-074A											
MO-7169	55.26	55.39	Unw	---	---	---	---	---	A	Fol. Argill. Flysch	70°
MO-7173	64.51	64.65	W	60.82	137.43	1.020	2542	10.6	ME	Turbidite cycle	20-40°
QEEP-075A											
MO-7307	58.84	58.94	Unw	44.56	98.86	0.396	2566	10.4	SS C	Inclined turb. cycle	30°
MO-7320	82.21	82.32	Unw	44.66	111.72	0.452	2583	---	SS B-C	Inclined turb. cycle	25°
MO-7325	85.06	85.16	Unw	44.60	94.82	0.386	2606	23.1	ME C	Inclined turb. cycle	32°
QEEP-076A											
MO-7368	53.94	54.04	Unw	44.60	---	---	---	---	A	Inclined turb. cycle	70°
MO-7374	61.12	61.22	Unw	44.57	89.89	0.363	2588	10.5	ME	Inclined turb. cycle	45°
MO-7384	69.73	69.83	Unw	44.54	98.86	0.407	2642	---	B-C	Inclined turb. cycle	40-50
QEEP-077											
MO-6746	25.80	25.90	Unw	47.17	101.15	0.459	2597	43.3	ME	Turbidite cycle	70°
MO-6760	40.51	40.61	Unw	47.46	101.78	0.464	2577	42.0	ME	Turbidite cycle	70°

Localisation			Cure (W or Unw)	D (mm)	L (mm)	Masse (kg)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Type de bris	Lithologie	(α) angle Structure (B or F)
Échantillon No.	Profondeur (m)										
	de	à									
MO-6775	59.86	59.97	Unw	47.29	106.84	0.487	2595	43.6	ME	Turbidite cycle-SST	70°
QEEP-078											
MO-6802	36.08	36.18	Unw	47.24	98.91	0.450	2596	23.3	ME C	Turbidite cycle	69°
MO-6808	42.42	42.52	Unw	47.27	96.19	0.436	2583	15.0	ME	Turbidite cycle	62°
MO-6815	54.15	54.25	Unw	47.26	95.76	0.437	2601	28.3	ME	Turbidite cycle	70°
MO-6827	78.16	78.26	Unw	47.28	97.43	0.447	2602	41.2	ME	Turbidite cycle	70°
QEEP-059											
MO-7269	23.30	23.44	W	---	---	---	---	---	A	Turbidite cycle	70°
MO-7273	31.24	31.36	W	60.90	144.19	1.089	2593	13.6	ME	Turbidite cycle	65°
MO-7280	45.57	45.70	W	60.94	131.42	0.996	2598	19.7	ME	Turbidite cycle	70°
MO-7295	70.09	70.21	W	60.84	122.95	0.939	2627	18.9	ME	Turbidite cycle	70°

L'ordre des forages est présenté selon leur position géographique dans l'axe du tracé proposé du tunnel, du sud vers le nord.

Notes sur les bris :

- A- L'échantillon a été brisé durant la préparation
- B- L'échantillon a été brisé en deçà du seuil d'enregistrement de la presse
- C- La fissure se trouve le long d'un plan de faiblesse
- D- Bris non valide (ne traverse pas l'échantillon au complet)

SE- Ouverture simple SS – Cisaillement simple
 ME – Ouverture multiple MS – Cisaillement multiple

Tableau 3.6: Résumé des résultats de résistance à la compression avec module d'Young

Localisation			Cure (W or Unw)	D (mm)	L (mm)	Masse (g)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Module de Young (GPa)	% de UCS	Coefficient de poisson dynamique	Lithologie	Notes
Échantillon	Profondeur (m)												
	de	à											
QEEP-070													
MO-6680	49.75	49.85	Unw	47,06	95,28	432,30	2609	21,1	16,0	46%	0.31	Folded Turbidite	---
MO-6699	81.93	82.04	Unw	47,18	98,08	445,18	2597	43,8	17,4	39%	0,34	Incl. Turbidite cycle	---
MO-6717	101.56	101.67	Unw	46,98	99,79	453,58	2622	15,6	13,1	59%	0.34	Incl. Turbidite cycle	---
QEEP-072													
MO-7059	9.57	9.73	W	60,77	124,72	882,36	2439	43,9	25.8	67%	0.25	Foliated arg. Flysch	---
MO-7095	63.20	63.35	W	60,48	123,97	929,32	2610	---	---	---	---	Foliated arg. Flysch	(2)
QEEP-073													

Localisation		Cure (W or Unw)	D (mm)	L (mm)	Masse (g)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Module de Young (GPa)	% de UCS	Coefficient de poisson dynamique	Lithologie	Notes	
Échantillon	Profondeur (m)												
	de	à											
MO-6956	65.07	65.20	W	60,86	125,43	995,06	2727	57,1	46,4	4%	0.28	Fine SST Flysck matrix	---
QEEP-075A													
MO-7315	73.13	73.24	Unw	44,78	98,59	424,18	2732	51,3	28,9	37%	0.30	Incl.Turbidite cycle	---
MO-7330	91.24	91.36	Unw	44,58	103,18	419,20	2603	15,5	11,1	40%	0.32	Incl.Turbidite cycle	---
QEEP-076A													
MO-7380	67.28	67.37	Unw	44,73	89,55	377,25	2681	57,1	23,0	33%	0.26	Incl.Turbidite cycle	---
MO-7392	79.50	79.59	Unw	44,64	90,49	367,10	2593	24,7	12,2	39%	0.34	Incl.Turbidite cycle	---
QEEP-077													
MO-6753	38.95	39.06	Unw	47,26	96,01	437,37	2597	59,4	11,4	15%	0.33	Incl.Turbidite cycle	---
MO-6769	57.57	57.65	Unw	47,22	95,66	435,89	2603	51,9	12,4	39%	0,25	Incl.Turbidite cycle	---
QEEP-059													
MO-7288	58.69	58.82	W	---	---	966,12	---	---	--	---	---	Turbidite Cycle	(1)
MO-7301	77.39	77.52	W	60,59	128,24	993,94	2688	56,8	17,8	13%	0.32	Turbidite Cycle	---

L'ordre des forages est présenté selon leur position géographique dans l'axe du tracé proposé du tunnel, du sud vers le nord.

Notes: (1) Échantillon brisé durant les manipulations
(2) Rupture à très petite charge

3.2.3.3 Essai de résistance à la traction par écrasement latéral (Brésilien)

L'essai de résistance à la traction par écrasement latéral, dit Brésilien, permet de déterminer la résistance à la traction du roc intacte. Il a été réalisé sur des carottes dont le ratio longueur-diamètre était compris entre 0,5 et 0,75. La presse brésilienne utilisée au laboratoire de **exp** à Montréal rencontrait les exigences spécifiées dans la norme ASTM D3967-08. Le tout jumelé à un système d'acquisition de données. En raison de la présence de litage ou de foliation, une attention particulière a été accordée à la direction axiale de chargement. Les essais ont été réalisés sur les carottes selon les deux conditions de conservations, sèches ou humides, tel que décrit précédemment. Le tableau 3.7 ci-dessous résume les résultats.

Tableau 3.7: Résumé des résultats : Essai de traction (essai brésilien)

Localisation		Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Masse (g)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Charge (N)	Résistance à la traction (MPa)	Type de bris	Lithologie	Angle de chargement	
Échantillon	Profondeur (m)											
	de	à										
QEEP-063												
MO-6658	29.40	29.42	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	---

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Masse (g)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Charge (N)	Résistance à la traction (MPa)	Type de bris	Lithologie	Angle de chargement
Échantillon	Profondeur (m)											
	de	à										
QEEP-070												
MO-6669	35.91	35.94	Unw	47.11	31.69	141.7	2571	4000	1,68	NCF, LA	SST-Turbidite	40° à B
MO-6681	51.13	51.15	Unw	47.12	23.11	104.0	2581	N/D (2)	---	NCF, LA	SST-Turbidite	60° à B
MO-6687	64.97	65.00	Unw	47.13	30.08	132.4	2515	8000	3,67	CF, LA	Turbidite	7° à B
MO-6701	82.31	82.33	Unw	47.23	20.70	93.8	2592	6000	3,24	NCF, LA	Turbidite	55° à B
MO-6713	93.04	97.07	Unw	46.95	30.12	136.5	2627	9000	4,05	NCF, LA	MDST-Turbidite	40° à B
MO-6719	102.02	102.04	Unw	47.13	18.07	81.6	2601	9000	6.28	CF, LA	SST-Turbidite	60° à B
MO-6725	108.89	108.92	Unw	47.14	27.12	122.6	2599	12000	6.14	CF, LA	SST-Turbidite	55° à B
QEEP-072												
MO-7061	9.84	9.88	W	60.72	40.80	287.8	2438	20000	5.23	CF	Indurated shale	70° à B
MO-7070	21.00	21.04	W	60.58	40.41	286.6	2464	12000	3.03	CF	SST-Foliated Flysch	10-30° à F
MO-7078	42.71	42.75	Unw	60.48	40.70	336.9	2624	10000	2.45	NCF, LA	Indurated shale	50° à F
MO-7082	48.69	48.73	W	60.08	42.58	313.6	2601	6000	1.24	CF, LA	Foliated Flysch matrix	40° to F
MO-7091	59.45	59.49	W	60.41	25.57	191.6	2614	5000	2.24	NCF, LA	Tectonic Breccia	45° à F
MO-7097	63.51	63.55	W	60.26	38.80	266.4	2605	14000	4.04	CF, LA	Tectonic Breccia	30° à F
QEEP-073												
MO-6936	31.54	31.69	W	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Foliated Flysch	---
MO-6940	33.76	33.80	W	60.73	36.75	276.4	2593	12000	3.58	CF, LA	SST-Turbidite	40° à B
MO-6951	55.89	55.99	W	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Foliated Flysch	---
MO-6958	65.30	65.34	W	60.86	---	---	---	---	---	CF	Indurated shale	Perp. à B
MO-7129	40.05	40.14	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Foliated Flysch	---
MO-7131	74.20	74.24	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Foliated Flysch	---
QEEP-074												
MO-7145	20.47	20.52	W	60.38	18.91	140.4	2586	8000	4.68	NCF, LA	SST-Turbidite	50° à B

Localisation			Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Masse (g)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Charge (N)	Résistance à la traction (MPa)	Type de bris	Lithologie	Angle de chargement
Échantillon	Profondeur (m)											
	de	à										
MO-7156	37.00	37.04	Unw	60.22	38.55	282.4	2568	10000	2.01	CF, LA	Turbidite	65° à B
MO-7163	52.22	52.32	W	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	MDST-Turbidite	---
QEEP-074A												
MO-7170	55.66	55.71	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Foliated Flysch	---
MO-7172	64.47	64.51	W	60.49	35.30	244.0	2405	N/D (2)	---	CF, LA	Foliated Flysch	Mult. Fol.
MO-7181	73.01	73.04	W	60.51	28.60	208.1	2529	N/D (2)	---	NCF, LA	Folded Turbidite	60° à B
QEEP-075A												
MO-7309	59.59	59.62	Unw	44.67	24.47	98.0	2555	N/D (2)	---	CF, LA	Turbidite	30° à B
MO-7317	75.43	75.46	Unw	44.87	25.46	101.0	2509	4000	2.16	NCF, LA	Turbidite	40-45° à B
MO-7318	82.33	82.38	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	---
MO-7324	84.81	84.84	Unw	44.66	24.06	94.0	2494	N/D (2)	---	NCF, LA	Turbidite	25° à B
MO-7332	91.83	92.00	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	---
QEEP-076A												
MO-7366	51.44	51.47	Unw	44.66	26.98	111.3	2626	N/D (2)	---	CF, LA	Folded Turbidite	70° à B
MO-7376	61.39	61.42	Unw	44.50	25.91	105.1	2606	4000	2.32	NCF, LA	Turbidite	45° à B
MO-7379	67.05	67.08	Unw	44.69	26.61	107.4	2585	13000	6.94	CF, LA	Turbidite	55° à B
MO-7394	80.81	80.84	Unw	44.63	31.77	127.6	2575	6000	2.60	CF, LA	Turbidite	60° à B
MO-7432	69.98	70.04	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	---
QEEP-077												
MO-6744	25.62	25.65	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	SST-Turbidite	---
MO-6755	39.84	39.87	Unw	47.26	25.12	111.0	2519	N/D (2)	---	LA	Turbidite	70° To B
MO-6761	45.36	45.38	Unw	47.27	23.32	103.3	2517	7000	4.08	CF, LA	Turbidite	70° To B
MO-6767	57.37	57.40	Unw	46.43	26.98	113.2	2474	8000	4.34	LA	SST-Turbidite	70° à B
MO-6776	64.92	64.95	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	70° à B
MO-6785	75.30	75.33	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	60° à B
QEEP-078												
MO-6800	32.66	32.69	Unw	47.32	33.14	148.9	2557	N/D (2)	---	CF, LA	Turbidite	---
MO-6806	45.58	45.64	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	68° à B
MO-6813	55.78	55.81	Unw	47.34	25.41	114.5	2571	6000	3.33	CF, LA	Turbidite	70° à B
MO-6819	61.34	61.37	Unw	47.28	28.78	125.2	2527	8000	3.58	CF, LA	Turbidite	72° à B
MO-6828	72.91	72.94	Unw	47.40	29.10	131.2	2551	11000	5.29	CF	SST-Turbidite	70° à B
MO-6837	79.53	79.56	Unw	47.35	31.66	143.3	2565	11000	4.75	CF, LA	Turbidite	73° à B

Échantillon	Localisation		Cure (W or Unw)	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Masse (g)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Charge (N)	Résistance à la traction (MPa)	Type de bris	Lithologie	Angle de chargement
	Profondeur (m)											
	de	à										
QEEP-059												
MO-7275	31.44	31.51	Unw	---	---	---	---	N/D (1)	---	---	Turbidite	---
MO-7282	45.77	45.84	Unw	60.53	30.69	218.5	2480	4000	1.44	NCF, LA	Turbidite	70° To B
MO-7290	58.90	58.98	W	60.76	31.50	238.9	2617	10000	3.35	CF, LA	Turbidite	75° à B
MO-7297	70.36	70.39	W	60.71	34.20	264.6	2646	16000	3.01	CF	Turbidite	70° à B
MO-7303	77.60	77.64	Unw	60.71	28.22	212.3	2595	6000	2.34	CF, LA	SST- Turbidite	70° à B

L'ordre des forages est présenté selon leur position géographique dans l'axe du tracé proposé du tunnel, du sud vers le nord.

(1) L'échantillon a été brisé durant la préparation

(2) L'échantillon a été brisé en deçà du seuil d'enregistrement

Types de bris

CF: Fissure au centre. La fissure ne semble pas affectée par la structure de la roche

NCF: Fissure non située au centre. La fissure ne passe pas par le centre du disque. Souvent associé à LA (structural)

LA: La fissure suit le plan du litage ou la foliation. Affectée par la structure de la roche

Angle de chargement: Direction de l'axe de chargement versus le plan du litage de l'échantillon

3.2.3.4 Indice d'abrasivité Cerchar

L'essai d'abrasivité Cherchar est une procédure d'essai commun pour l'estimation de l'usure des équipements. L'abrasivité de la roche régit la performance des têtes de coupe, le taux de son remplacement et, par conséquent, les coûts d'excavation des tunnels. Il exprime une caractéristique comportementale du roc plutôt qu'une propriété physique ou mécanique fondamentale.

La méthode d'essai consiste à mesurer l'usure de la pointe du stylet en acier en forme de cône et de dureté Rockwell connue causée par le frottement contre une surface rocheuse fraîchement brisée ou sciée pour une longueur prescrite. Cette méthode d'essai est destinée aux surfaces rocheuses fraîchement brisées, cependant, les surfaces sciées sont recouvertes quand une surface rocheuse satisfaisante ne peut être obtenue. L'échantillon de roche est fixé dans un support avec la surface fraîche vers le haut. Une tige en acier trempé conique de 90° fixée dans une tête de 7,5 kg est fixée et tirée sur un centimètre en travers de la surface de la roche pendant 1 seconde. Les pointes de la tige sont ensuite examinées au microscope réticulaire et deux diamètres perpendiculaires de la surface d'usure résultants sont enregistrés pour chaque pointe. Selon le mode opératoire, l'indice d'abrasivité Cerchar est calculé. Un rapport complet du test effectué par l'École Polytechnique de Montréal se trouve à l'annexe III. Le tableau 3.8 ci-dessous résume les résultats des tests.

Tableau 3.8: Sommaire des résultats: Indice d'abrasivité Cerchar (CAI)

Échantillon No.	Localisation		Cure humide ou sèche	CAI s	CAI	Classification de l'abrasivité	Lithologie
	Profondeur (m) de	à					
QEEP-070							
MO-6666	20,67	20,81	Sèche	0,69	1,16	Moyenne	Turbidite plissée perturbée, grise
MO-6675	45,50	45,60	Sèche	0,53	1,00	Faible à moyenne	Turbidite foliée (verticalement)
MO-6691*	71,66	71,81	Sèche	0,92	1,39	Moyenne	Turbidite plissée grise
MO-6714	96,68	96,78	Sèche	0,54	1,01	Moyenne	Turbidite plissée grise
QEEP-072							
MO-7066	13,38	13,60	Humide	1,13	1,60	Moyenne	Shale induré noir
MO-7075	39,75	39,93	Humide	0,67	1,14	Moyenne	Flysch folié
MO-7093	61,82	62,03	Sèche	0,49	0,97	Faible	Brèche
MO-7102	73,85	74,00	Sèche	1,48	1,95	Moyenne	Bloc de grès dans Flysch
QEEP-073							
MO-7128	20,50	20,72	Sèche	0,45	0,93	Faible	Turbidite - mudstone
MO-6950	48,04	48,27	Sèche	0,79	1,26	Moyenne	Flysch folié
MO-6962	74,41	74,57	Sèche	0,39	0,87	Faible	Flysch folié
QEEP-074/ 074A							
MO-7150	24,00	24,15	Sèche	0,54	1,01	Moyenne	Turbidite plissée grise
MO-7157	44,90	45,05	Sèche	0,43	0,91	Faible	Turbidite plissée grise
MO-7167**	71,66	71,87	Humide	---	0,47	Très faible	Flysch folié
QEEP-075A							
MO-7313**	71,45	71,59	Sèche	---	0,35	Très faible	Turbidite plissée grise
MO-7334**	95,88	96,00	Sèche	---	0,52	Faible	Turbidite plissée grise
QEEP-076A							
MO-7377	63,41	63,56	Sèche	0,54	1,01	Moyenne	Turbidite plissée grise
MO-7390**	78,63	78,78	Sèche	---	0,58	Faible	Turbidite plissée grise
QEEP-077							
MO-6757	41,34	41,44	Sèche	0,76	1,23	Moyenne	Turbidite plissée grise – grès
MO-6772	61,99	62,08	Sèche	0,71	1,18	Moyenne	Turbidite plissée grise – grès
MO-6786	76,10	76,21	Sèche	0,61	1,08	Moyenne	Turbidite plissée grise
QEEP-078							
MO-6796	14,31	14,41	Sèche	0,52	0,99	Faible	Turbidite plissée grise
MO-6804	39,09	39,17	Sèche	0,58	1,05	Moyenne	Turbidite plissée grise
MO-6824	69,81	69,92	Sèche	0,62	1,09	Moyenne	Turbidite plissée grise
QEEP-059							
MO-7278	37,04	37,13	Sèche	0,89	1,36	Moyenne	Turbidite plissée grise - grès
MO-7291	60,47	60,59	Sèche	0,39	0,87	Faible	Turbidite plissée grise
MO-7304	80,48	80,60	Sèche	0,52	0,99	Faible	Turbidite plissée grise
Note:							
CAIs : est l'indice Cerchar non corrigé pour surfaces lisses, résultant de forage au diamant ou traits de scie (moyenne de rayures)							
CAI : est l'indice Cherchar calculé selon la norme ASTM D-7626-10							
* Échantillon brisé après 3 rainures							
** Essai réalisé sur surface naturelle							

3.2.3.5 Indice de durabilité Slake

L'essai de durabilité Slake est utilisé pour déterminer la résistance du roc, particulièrement des roches de nature argileuse (mudstones, siltstone, certaines variétés de grès et ardoises, etc.) par

une combinaison d'humectations et d'abrasions de la roche. Les résultats sont exprimés sous forme d'un index de durabilité Slake pour chaque type de roche. Cet essai est utilisé couramment pour évaluer la réponse immédiate et le comportement à long terme des roches tendres dans les ouvrages de construction tels que les tunnels.

Le montage pour l'essai de durabilité Slake vise à déterminer la durabilité des roches tendres et estimer leur degré probable de détérioration dans le temps par simulation de l'exposition naturelle de la roche à des cycles de trempage et séchage. Ce test est réalisé pour connaître la résistance offerte par un échantillon de roche à l'affaiblissement et la désintégration lorsqu'il est soumis à deux cycles standards de séchage et de mouillage dans un fluide de délitage, habituellement de l'eau.

Les échantillons d'essai sont constitués d'un minimum de 10 morceaux de roche, pesant chacun 40 à 60 g, pour donner un poids total d'échantillon allant de 400 à 600 g. Les morceaux de roche devraient être sphériques et leurs arrêtes arrondies lors de la préparation. Les procédures d'essai sont détaillées dans le rapport final préparé par l'École Polytechnique de Montréal présenté à l'annexe III. Le tableau 3.9 ci-dessous résume les résultats.

Tableau 3.9: Sommaire des résultats: Essai de durabilité Slake

Localisation			Cure (H ou S)	Index de durabilité Slake (%)	Température de l'eau (degré C)		Teneur en eau initiale (%)	Lithologie
Échantillon No.	Profondeur (m)				plage	moyenne		
	de	à						
QEEP-070								
MO-6668	33,84	34,11	Sèche	62,0	24.1-25.2	24,7	---	Turbidite plissée et perturbée, grise
MO-6684	56,08	56,50	Sèche	73,6	24.6-26.1	25,3	---	Turbidite plissée et perturbée, grise
MO-6694	73,94	74,30	Sèche	88,2	24.6-26.0	25,3	---	Turbidite foliée, grise
MO-6715	98,60	98,92	Sèche	82,1	24.8-26.9	25,6	---	Turbidite foliée, grise
QEEP-072								
MO-7065	12,05	12,24	Sèche	98,9	25.1-25.9	25,3	0,4	Shale induré noir
MO-7077	41,61	41,85	Sèche	21,8	24.5-26.3	25,2	0,8	Flysch folié, gris verdâtre
MO-7098	64,74	64,97	Sèche	59,4	23.8-24.9	24,3	0,3	Matrice de Flysch (Brèche)
QEEP-073								
MO-6935	29,00	29,35	Sèche	70,0	25.0-25.2	25,1	0,5	Turbidite plissée et perturbée, grise
MO-6952	57,95	58,21	Sèche	46,8	24.2-25.1	24,7	0,6	Matrice de Flysch (Brèche)
MO-6968	80,35	80,70	Sèche	89,9	24.3-26.4	25,4	0,5	Turbidite foliée, grise
QEEP-074/074A								
MO-7151	29,26	29,50	Sèche	95,8	24.2-25.3	24,9	0,4	Turbidite plissée et perturbée, grise
MO-7159	49,26	49,45	Sèche	84,6	23.7-25.2	24,4	0,4	Turbidite foliée, grise
MO-7166	69,96	70,15	Sèche	83,9	23.3-24.6	23,9	0,4	Turbidite plissée et perturbée, grise
QEEP-075A								
MO-7312	66,79	67,09	Sèche	66.8	23.9-24.7	24.2	0.3	Turbidite plissée et perturbée, grise
MO-7333	93,66	93,94	Sèche	91.3	23.8-25.1	24.7	0.2	Turbidite foliée, grise
QEEP-076A								
MO-7370	53,63	53,92	Sèche	89.3	22.0-26.2	24.1	0.3	Turbidite foliée, grise

Localisation			Cure (H ou S)	Index de durabilité Slake (%)	Température de l'eau (degré C)		Teneur en eau initiale (%)	Lithologie
Échantillon No.	Profondeur (m)				plage	moyenne		
	de	à						
MO-7386	74,42	74,70	Sèche	91,3	23.9-25.1	24.4	0.2	Turbidite plissée et perturbée, grise
QEEP-077								
MO-6750	32,70	32,98	Sèche	81,2	24.4-25.6	25,1	0,8	Turbidite foliée, grise
MO-6763	48,21	48,42	Sèche	92,4	23.4-25.7	24,5	0,8	Turbidite foliée, grise
MO-6778	66,37	66,63	Sèche	91,9	25.6-27.1	26,2	0,4	Turbidite foliée, grise
QEEP-078								
MO-6799	27,42	27,66	Sèche	90,7	25.1-25.8	25,5	0,5	Turbidite foliée, grise
MO-6811	51,15	51,39	Sèche	91,7	23.8-24.9	24,5	0,8	Turbidite foliée, grise
MO-6831	75,62	75,92	Sèche	96,9	23.7-25.3	24,5	0,7	Turbidite foliée, grise
QEEP-059								
MO-7267	22,18	22,33	Sèche	97,8	24,0-24,8	24,5	0,4	Turbidite foliée, grise
MO-7283	46,53	46,70	Sèche	96,0	24,4-25,3	25,0	0,5	Turbidite foliée, grise
MO-7292	65,32	65,51	Sèche	90,8	24,2-25,3	24,8	0,4	Turbidite foliée, grise
Les sondages sont présentés selon leur position géographique, par rapport à l'alignement proposé du tunnel, du sud au nord								

3.2.3.6 Index de pénétration

L'index de pénétration est un essai réalisé pour évaluer les caractéristiques de forabilité des formations rocheuses dans le cas par exemple des excavations pour tunnels. C'est le seul essai où la surface de l'échantillon de roc, coupée à la scie dans le cas de cette étude, est en fait pénétrée par un outil provoquant l'écrasement et l'écaillage d'une manière similaire à ce qui se produit avec les têtes de coupe pendant le forage d'un tunnel par un tunnelier.

L'indice est un indicateur de la fragilité de la roche qui représente la résistance à la pénétration. Dans ce test, un pénétrateur conique standard est pressé dans un échantillon de roche maintenu dans un anneau de confinement en acier. La charge et le déplacement du pénétrateur sont enregistrés par ordinateur. La pente de la courbe force vs pénétration indique le degré d'excavabilité de la roche. La dureté, la fragilité et la porosité de l'échantillon sont des facteurs qui affectent les résultats. Le programme calcule et trace la ligne de référence à 45 ° de pente, une pente moyenne, une pente de pointe (de l'origine à la charge de pointe) et la pente de l'énergie représentée par l'aire sous la courbe.

Les résultats complets des essais de pénétration effectués par l'Institut des mines du Colorado sont donnés dans Annexe III b6. Le tableau 3.10 ci-dessous présente un résumé des résultats obtenus. Notons que plusieurs échantillons ont dû être remplacés dans le cadre du programme d'essai en raison du bris de certains échantillons survenus lors de l'expédition au Colorado.

Tableau 3.10: Sommaire des résultats – Essais de pénétration

Localisation			Cure humide ou sèche	Lithologie	Charge maximale (lbs)	Pente de pointe (kips/pouce)
Échantillon numéro	Profondeur (m)					
	De	à				
QEEP-070						
MO-6674	39.80	39.92	Sèche	Turbidite (Mudstone /Siltstone)	3 721	15
MO-6686	60.46	60.60	Sèche	Turbidite (MDST/SILTST/grès)	13 356	63
MO-6702	85.18	85.32	Sèche	Turbidite finement foliée	10 911	44
MO-6726	109.23	109.34	Sèche	Turbidite finement foliée	10 981	53
QEEP-072						
MO-7072	27.48	27.72	Sèche	Shale induré noir	12 108	66
MO-7086	51.15	51.40	Sèche	Flysch folié, gris verdâtre	2 881	12
MO-7100	67.61	67.75	Sèche	Brèche Tectonique (mat de Flysch)	6 379	28
QEEP-073						
MO-6925	13.15	13.32	Sèche	Flysch argileux perturbé	2 930	30
MO-6945	40.69	40.93	Sèche	Turbidite plissée	6 443	115
MO-6954	61.43	61.65	Humide	Flysch folié (poss. Shale ind.)	25 718	66
QEEP-074-074A						
MO-7152	36.35	36.50	Sèche	Turbidite foliée micro fracturée	10 895	44
MO-7164	58.93	59.05	Sèche	Turbidite foliée micro fracturée	9 831	48
MO-7183	74.68	74.85	Sèche	Turbidite finement foliée	1 607	7
QEEP-075A						
MO-7305	56.91	57.15	Sèche	Turbidite finement foliée	---	---
MO-7322	81.20	81.32	Sèche	Turbidite finement foliée	19 793	81
QEEP-076A						
MO-7371	54.68	54.78	Sèche	Turbidite foliée micro fracturée et calcite	11 204	45
MO-7382	68.40	68.55	Sèche	Turbidite finement foliée	18 839	82
QEEP-077						
MO-6758	43.67	43.77	Sèche	Turbidite finement foliée	5 160	22
MO-6771	61.44	61.53	Sèche	Turbidite finement foliée	4 608	22
MO-6782	73.76	73.94	Sèche	Turbidite finement foliée	6 374	44
QEEP-078						
MO-6798	26.76	26.86	Sèche	Turbidite finement foliée	5 904	25
MO-6812	54.30	54.45	Sèche	Turbidite finement foliée	5 556	22
MO-6832	76.44	76.54	Sèche	Turbidite finement foliée	4 527	19
QEEP-059						
MO-7271	28.08	28.20	Sèche	Turbidite finement foliée (SILTST.- grès)	13 051	73
MO-7284	47.20	47.34	Sèche	Turbidite finement foliée	5 035	20
MO-7293	70.59	70.72	Sèche	Turbidite finement foliée	---	---
Les sondages sont présentés selon leur position géographique par rapport à l'alignement du tunnel, du sud au nord						
Aucun résultat pour les échantillons MO-7293 et MO-7305: bris au cours du transport						

3.2.3.7 Diffraction au rayon x (XRD)

La minéralogie rocheuse peut fournir des informations utiles sur la forabilité des roches, en particulier en ce qui concerne leur contenu en minéraux durs et abrasifs, la nature des produits d'altération (minéraux d'argile) et la minéralogie de certaines caractéristiques spéciales, telles que les veines, les oxydes et les minéraux sulfurés. Elle est également utilisée pour confirmer l'identification des minéraux effectuée lors de l'analyse pétrographique. Le laboratoire de radiocristallographie de l'Université du Québec à Montréal a effectué une analyse de diffraction aux rayons x des carottes de roche intactes dans le but d'identifier les minéraux de la masse rocheuse, ainsi que des veines de carbonate, des minéraux sulfurés et de graphite et d'autres minéraux noirs, comme la pyrolusite (qu'on retrouve souvent sous forme de carbonates dendritiques).

Les échantillons sont broyés et analysés avec un Diffractomètre Bruker D5000 pour l'identification générale des minéraux. Les deux échantillons de minéraux argileux prévus pour l'analyse ont été séparés en plusieurs fractions dans de l'eau bi-distillée. Les différentes fractions ont ensuite été analysées. Dans les roches riches en mudstone, un échantillon de roche entier a été analysé et une autre fraction (0-20µm) a été analysée séparément pour une meilleure identification du type de minéraux argileux.

Lorsque des veines de carbonate étaient identifiées, une partie de l'échantillon a été traité avec de l'acide chlorhydrique « HCl » (N / 10) dans le but de quantifier les totaux en carbonates et de les comparer avec les résultats au diffractomètre. Les détails des méthodes utilisées sont présentés dans les rapports de diffraction rayon x (XRD) insérés en annexe III b8. Le tableau 3.11 des pages suivantes résume la minéralogie des carottes de roche soumises aux essais.

3.2.3.8 Pétrographie

Des analyses pétrographiques par lames minces ont été effectuées pour obtenir des informations utiles sur la minéralogie et les caractéristiques microscopiques de la roche, ce qui pourrait avoir un impact significatif sur la forabilité, notamment en termes de contenu en minéraux durs. Des échantillons intacts de roc choisis parmi une variété de lithologies différentes ont été envoyés au Centre de pétrographie de Vancouver (Vancouver Petrographics) pour une analyse pétrographique, qui comprenait la photographie, la coloration des feldspaths potassiques et un rapport complet, y compris la proportion en minéraux durs ainsi qu'une dureté moyenne du roc basée sur l'échelle de Moh de dureté minérale. Le laboratoire d'essai a fourni une analyse de chaque échantillon de carotte avec plusieurs détails sur l'identification des principaux minéraux, des textures, des altérations et des environnements sédimentaires proposés. Leurs rapports complets sont présentés en annexe III b8 du présent document. Un résumé de la minéralogie est présenté dans le tableau 3.12 à la suite des résultats de diffraction au rayon x.

Lorsque possible, les échantillons soumis à la pétrographie ont été jumelés avec des échantillons analysés par diffraction. Pour ces cas, les échantillons choisis étaient aussi homogènes que possible et de même profondeur relative. Les descriptions pétrographiques peuvent ensuite être comparées avec leur contenu minéralogique.

MINÉRALOGIE

Type de roche - Description - Caractéristiques particulières	Totaux minéraux durs / abrasifs											Carbonates				Plag.		K-spar		Minéraux argileux				Graphite					
	Quartz		Autre		Σ %		Calcite		Dolom.		% HCL*		Albite		Microcl.		Kaol.		Chlor.		Illite		Ill.-Sm. - Chl.		Micas		Clin.		
Mudstone /Mudstone gris (turbidite) avec veines de calcite	54.3	---	54.3	3.6	4.6	---	11.2	2.1	1.7	16.0	5.0	0.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	52.2	---	52.2	10.9	5.1	15.1	12.5	1.5	1.1	8.9	1.4	---	5.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) avec veines de calcite	27.3	---	27.3	47.4	2.2	---	4.0	1.0	<0.7	13.8	---	1.0	2.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	46.7	---	46.7	31.2	3.9	32.4	8.2	4.9	---	2.6	1.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée, avec veines de calcite	38.6	---	38.6	23.9	2.6	---	5.8	2.3	1.0	12.9	9.0	3.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	51.9	---	51.9	11.5	4.5	15.6	11.6	2.1	0.2	13.2	4.6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée, avec veines de calcite	21.8	---	21.8	41.5	19.4	---	8.2	2.1	1.2	2.9	---	1.2	1.1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	51.8	---	51.8	10.2	6.8	15.8	8.6	5.2	0.3	12.6	4.3	1.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée, avec veines de calcite	24.4	---	24.4	57.6	7.0	67.4	3.0	1.1	0.4	4.6	---	---	0.3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	32.4	---	32.4	---	---	---	6.5	---	---	---	---	---	0.7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée avec veines de calcite	53.3	---	53.3	17.4	8.7	26.8	5.4	3.2	0.4	2.9	5.5	2.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	51.5	---	51.5	3.1	6.4	9.1	6.1	3.5	0.5	21.8	4.2	2.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée avec veines de calcite	1.9	---	1.9	94.7	---	94.7	1.1	0.9	---	1.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	31.5	---	31.5	14.5	2.1	---	7.7	4.8	2.6	16.3	11.5	8.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée avec veines de calcite	30.4	---	30.4	14.1	16.2	29.8	15.5	6.1	1.6	8.6	6.7	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	30.3	---	30.3	10.6	5.2	---	8.3	3.9	1.2	18.2	15.4	6.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée avec veines de calcite	31.8	---	31.8	15.1	12.2	30.1	17.2	8.5	0.9	8.3	5.3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	51.5	---	---	19.4	4.9	29.7	4.6	2.9	1.6	9.6	---	---	5.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée avec veines de calcite	57.9	---	57.9	1.8	5.4	7.5	15.1	7.1	2.1	---	---	---	2.5 / 1.1*	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	15.9	---	15.9	79.1	---	77.7	1.7	0.9	---	---	---	---	0.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mudstone gris / grès fin (turbidite) déformée avec veines de calcite	51.4	---	51.4	2.3	6.9	8.8	12.5	8.2	0.6	---	---	---	6.5 / 1.1*	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

MINÉRALOGIE														
Type de roche - Description - Caractéristiques particulières	Totaux minéraux durs / abrasifs			Carbonates			Plag.	K-spar	Minéraux argileux					Graphite
	Quartz	Autre	Σ %	Calcite	Dolom.	% HCL*			Albite	Microcl.	Kaol.	Chlor.	Illite	
istone /Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	53,7	---	53,7	7,8	5,1	13,9	8,8	5,2	0,4	8,4	---	---	7,6 / 2,1*	---
aine de calcite dans turbidite formée grise	11,7	---	11,7	72,2	3,2	77,1	3,1	1,8	0,3	1,6	---	---	4,3 / 1,4*	---
rbidite grise déformée avec veinules calcite	25,4	---	25,4	53,1	2,4	52,5	2,9	1,7	0,2	5,4	---	---	6,1 / 2,1*	---
istone / Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	53,8	---	53,8	11,4	6,3	15,4	5,3	3,1	0,4	9,4	---	---	7,3 / 2,2*	---
istone /Mudstone gris (turbidite)	15,8	---	15,8	2,1	2,1	---	20,3	11,6	2,0	19,9	---	4,5	21,4	---
istone /Mudstone gris (turbidite)	58,8	---	58,8	2,8	4,5	9,8	13,0	4,2	0,6	9,1	---	---	6,7	---
istone /Mudstone gris (turbidite)	40,3	---	40,3	4,6	1,7	---	22,6	10,4	1,8	1,5	---	5,4	11,4	---
istone /Mudstone gris (turbidite)	49,4	---	49,4	6,5	3,9	11,5	20,1	11,1	0,4	6,2	---	---	1,5	---
istone/Mudstone interité	18,4	---	18,4	0,9	2,5	---	23,6	13,5	2,3	6,8	---	6,1	25,6	---
udstone / Siltstone / grès gris (turbidite)	48,1	---	48,1	0,9	9,9	10,5	11,7	4,2	0,3	13,2	---	---	11,2	---
udstone / Siltstone / grès gris (turbidite)	26,4	---	26,4	37,9	6,2	---	7,4	1,9	1,1	10,1	7,1	1,4	---	---
udstone / Siltstone / grès gris (turbidite)	34,7	---	34,7	6,5	4,1	9,1	6,4	3,5	0,3	11,1	3,4	---	---	---
istone / Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	28,1	---	28,1	9,4	4,2	---	14,9	6,2	0,8	13,3	17,9	4,8	---	---
istone / Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	45,6	---	45,6	10,1	7,2	16,2	10,7	4,7	0,6	10,8	---	---	10,3	---
istone / Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	22,3	---	22,3	35,2	2,9	---	8,8	4,1	1,6	11,8	9,5	3,4	---	---
istone / Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	42,6	---	42,6	18,1	3,8	22,3	9,2	6,2	0,7	6,7	---	---	12,1	---
istone /Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	21,6	---	21,6	22,7	8,4	---	8,6	1,9	1,7	9,7	21,3	3,2	---	---
istone /Mudstone gris (turbidite) ec veinules de calcite	45,3	---	45,3	22,1	4,4	26,9	6,5	2,4	1,0	9,8	---	---	7,7	---
istone /Mudstone gris (turbidite)	54,1	---	54,1	3,3	8,4	12,3	11,5	7,1	0,6	---	---	1,1	4,6 / 1,1*	7,7
istone /Mudstone gris (turbidite)	52,2	---	52,2	7,3	4,9	13,7	13,7	10,5	0,5	---	---	1,3	5,5 / 1,3*	2,8
istone /Mudstone gris (turbidite)	55,8	---	55,8	4,9	2,6	7,1	14,6	9,8	0,5	---	---	1,4	5,8 / 1,4*	3,6

on géographique par rapport à l'alignement du tunnel, du sud au nord

n de la nature schisto/argileuse de la roche, 2 gr. de chaque échantillon ont été séparés dans de l'eau distillée et analysés afin de mieux identifier les minéraux argileux dans les forages QEEP-070, 077, 078 et dans les analyses

échantillon a été traité avec 1N / 10 HCL pour quantifier les carbonates et les comparer avec les résultats du diffractogramme

smectite

culés après traitement N/10 HCl

Type de roche - Description - Caractéristique spécial	MINÉRALOGIE														Sulfur		
	Total des minéraux durs / abrasifs				Carbonates	Séricite	Plag.	K-Spar	Chlorite	Chl.- Fuchsite	Limonite	Rutile	Micas- Bio	Graphite	Pyrite	Marca	6.5
	Quartz	Tourmaline	Zircon	Σ %													
minéraux (H)	7	7	7.5		3.5	3	6	6	3	3	4.5	5.5	3	1,5	6.5	6.5	
iltstone/Mudstone folié, traces de veinules carb.	35	<<1%	---	35	10	45	---	1	5	---	2	<1	---	---	1	---	---
udstone/grès fin folié, traces de veinules carb.	25	---	---	25	10	45	7	2	5	---	3	---	1	---	2	---	---
udstone / Siltstone déformé, trace veinules carb. microfracturés	20	---	---	20	10	50	7	2	7	---	2	<1	<1	---	2	---	---
udstone/siltstone (turbidite), veinules de carb.	15	---	---	15	30	30	13	3	5	---	2	<1	<1	---	1	---	---
iltstone/Mudstone folié, traces de veinules carb.	30	---	---	30	10	40	7	2	5	---	2	<1	2	---	2	---	---
udstone / Siltstone / grès fin (Turbidite)	20	---	---	20	10	50	7	2	5	---	2	<1	2	---	2	---	---
grès fin (Turbidite)	30	---	<1	30	20	20	10	3	10	---	3	<1	2	---	1	---	---
monite à grain très fin/siltstone carboné et udstone	45	---	---	45	10	20	---	---	---	---	15*	<1	---	---	3-5	---	---
tertils de carbonates noirs et mudstone irifictique vert	40	---	---	40	---	20	---	---	---	2	20*	---	---	---	10	---	---
atrice de Flysch /Brèche : intertils de grès vagué ec siltstone	30	---	---	30	15	35	7	2	7	---	2*	<1	---	---	2	---	---
isonne fin et grès fin, foliés	30	---	---	30	15	35	5	5	7	---	1*	<1	1	---	1	---	---
iltstone /Mudstone gris (turbidite) avec veinules calcite	20	---	---	20	50	20	---	3	3	---	2*	<1	---	---	1	---	---
udstone finement lité / grès fin	30	---	---	30	10	45	5	2-3	5	---	2-3*	<1	---	---	1	---	---
iltstone riche en carbone avec mudstone	20	---	---	20	55	20	---	2	---	---	1*	<1	---	---	<1	---	---
èche tectonique ou roc hétérolithique avec atrice de shale	25	---	---	25	15	40	5	2	5	---	5*	<1	---	---	1	---	1
udstone folié avec siltstone mince	20	---	---	20	15	50	5	3	5	---	1*	<1	<1	---	1	---	---
grès fin folié et siltstone à grain moyen	25	<1	---	25	15	30	10	5	5	---	5*	<1	2	<1	1-2	---	---
udstone plissé et folié, trace de siltstone	25	---	---	25	10	50	5	5	---	---	2-3*	<1	---	---	1-2	---	---
iltstone/Mudstone intertilé	25	---	---	25	15	35	10	7	3-5	---	2-3*	<1	---	---	1-2	---	---
iltstone/Mudstone intertilé	20	---	---	20	15	40	3	10	7	---	3*	<1	<1	---	1	---	---

Type de roche - Description - Caractéristique spécial	MINÉRALOGIE														Sulfures Marca
	Total des minéraux durs / abrasifs				Séricite	Plag.	K-Spar	Chlorite	Chl.- Fuchsite	Limonite	Rutile	Micas- Bio	Graphite	Pyrite	
	Quartz	Tourmaline	Zircon	Σ %											
Minéraux (H)	7	7	7.5		3	6	6	3	3	4.5	5.5	3	1,5	6.5	

tertils de siltstone / mudstone avec carbonates	20	---	---	20	35	5	7	7	---	3-5*	<1	---	---	2
mudstone / Siltstone / grès fin (Turbidite)	20	---	---	20	40	5	5	5	---	2-3*	<1	1	---	1-2
Siltstone/Mudstone folié avec grès à grain fin à grossier	25	---	---	25	25	10	2	7	---	3*	<1	1	---	1
Mudstone folié fin / grès fin	25	<<1%	---	25	35	10	1	10	---	1	<1	1	---	1
grès fin interfitté / Mudstone	30	---	---	30	35	7	1	7	---	2	<1	1	---	1-2
grès fin interfitté / Mudstone	30	---	---	30	35	8	1	7	---	2	<1	1	---	1
tertils de Siltstone / Mudstone	25	---	<1	25	40	10	1	5	---	1	<1	1	---	2
Mudstone silteux / grès fin	20	---	---	20	45	10	1	5	---	1	<1	1	---	2*
tertils de siltstone / Mudstone avec traces de grès fin	20	---	---	20	50	5-7	<1	5	---	1	<1	1	---	1
Siltstone / Mudstone folié	25	---	---	25	45	5	3	3-5	---	1-2*	<1	<1	---	1-2
Siltstone / Mudstone folié	25	---	---	25	35	10	7	7	---	1-2*	<1	1-2	---	1-2
Siltstone / Mudstone folié	20	---	---	20	40	10	3	7	---	1-2*	<1	1-2	---	1-2

pentage
 rbone (matières organiques)
 i la limonite-C et C sont des mat. org. alors AVG H est réduit au second nombre /
 e Pyrite-Chalcopyrite
 position géographique par rapport à l'alignement du tunnel, du sud au nord

3.3 Essais qualitatifs de l'eau souterraine

3.3.1 Généralités

Des analyses de qualité des eaux souterraines ont été réalisées afin d'évaluer tout impact potentiel sur la construction et les matériaux. L'échantillonnage a été limité au forage QEEP-059 et a été effectué après l'installation et le développement d'un puits d'observation de 50 mm de diamètre dans la roche entre les élévations de 27,1 à 33,1 mètres. Le programme d'analyses chimiques pour les essais sur l'eau souterraine a été décrit par TransCanada (TCPL). Les échantillons prélevés ont été soumis aux analyses chimiques suivantes:

- Paramètres de qualité d'eau : pH, eH, conductivité, turbidité, oxygène dissous, dureté, solides en solution totale, solides en suspension totaux, alcalinité, BOD5;
- Gaz dissous: méthane;
- Métaux: aluminium, antimoine, arsenic, baryum, béryllium, bismuth, bore, cadmium, calcium, chrome, cobalt, cuivre, cyanite, fer, plomb, lithium, magnésium, manganèse, mercure, molybdène, nickel, phosphore, potassium, sélénium, silice, argent, sodium, strontium, tellure, thallium, thorium, tin, titane, uranium, vanadium, zinc et zirconium;
- Inorganiques: fluore, chlorure, brome, nitrate, nitrite, sulfate, sulfure, phosphate, ammoniac;
- Organiques : Hydrocarbures pétroliers (C10-C50);
- Paramètres radiologiques: Radium-226.

La ventilation détaillée des résultats des analyses a été fournie par Maxxam Analytique et a été incluse à l'annexe VIII.

3.3.2 Procédures et méthodologie

Les procédures et protocoles d'échantillonnage (investigation de site - document d'orientation EE4930-JOV-C-RP-0200) pour échantillonnage des eaux souterraines et le développement des puits ont été élaborés pour respecter les lignes directrices établies par le MDDELCC.

4 Clôture

Nous espérons que le contenu de ce rapport saura répondre à l'intention de cette investigation. Une attention particulière devrait être portée à la section «Restrictions d'utilisation du rapport», car il est considéré comme essentiel dans l'utilisation et l'interprétation adéquate du contenu de ce rapport. Si vous avez des questions sur le contenu de ce rapport, s'il vous plaît nous contacter à votre convenance.

5 Références

5.1 Références ASTM

ASTM D421-85. *Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants.*

ASTM D1586-08a. *Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.*

ASTM D2113-08. *Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation.*

ASTM D2487-10. *Standard Practice for Classification of Soil for Engineering Purposes (USCS).*

ASTM D2488-09a. *Standard Practice for Description and Identification of Soils.* ASTM. D3967-08. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.*

ASTM D4543-08. *Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.*

ASTM D-4633-10 *Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers.*

ASTM D4644-08. *Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks.*

ASTM D5079-08. *Practices for Preserving and Transporting Rock Core Samples.*

ASTM D5121-10. *Practice for Preparation of Rock Slabs for Durability Testing.*

ASTM D5434-09. *Guide for Field Logging of Subsurface Explorations of Soil and Rock.*

ASTM D5731-08. *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.*

ASTM D5878-08. *Standard Guides for Using Rock-Mass Classification Systems for Engineering Purposes.*

ASTM D6032-08. *Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core.*

ASTM D7012-10. *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.*

ASTM D7625-10. *Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method.*

ASTM STP523 special publication - *Direct Determination and Indirect Evaluation of Relative Density and Its Use on Earthwork Construction Projects*

5.2 Publications

Association française de normalisation (1994). Sols: reconnaissance et essais. Essai d'eau Lugeon. Norme française NF P 94-131.

Barton, N.R. et al. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Rock Support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, p. 189-236.

Basu, A., Mishra, D.A., Ann Roychowdhury, K. (2013). Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 72, p. 457-475.

Beniawski, Z.T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Vol. 1, p.97-106.

Castonguay, S., Dietrich, J. R., Morin, C., Ann Laliberté, J.-Y. (2001). Structural architecture of the St. Lawrence platform and Quebec Appalachians: insights from reprocessed (MNRQ) seismic reflection data. Geological Survey of Canada, Open File 4028, 1 sheet.

Castonguay, S., Tremblay, A., Ann Lavoie, D. (2002). Carte de compilation géologique Québec-Chaudière : Les ponts Géologiques de l'est du Canada. Transect 2, Québec, Geological Survey of Canada, Open File 4314, 2 sheets, scale 1: 125 000.

Comeau, F.A. (2005). Structure et stratigraphie de la zone parautochtone des Appalaches taconiennes dans la région de Québec. M.Sc. thesis, Université Laval, Québec, Qué.

Globenski, Y. (1987). Géologie des basses-terres du Saint-Laurent, Direction Générale de la Recherche Géologique et Minérale, MM 85-02.

Globenski, Y. et collaborateurs (1993). Lexique stratigraphique canadien. Région des Appalaches, des Basses-Terres du Saint-Laurent et des Îles de la Madeleine. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Québec, DV 91-23.

Houlsby, A. (1976). Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. *Q.J. Eng. Geol.* Vol. 9, pp 303-313.

Howell, J. V. (1957). Glossary of Geology and Related Sciences. American Geological Institute. Washington D.C. 325 p.

Kirkwood, D., Ayt-Ougougdal, M., Gayot, T., Beaudoin, G., Ann Pironon, J. (2000). Paleofluid-flow in a foreland basin, Northern Appalachians; from Syntectonic Flexural Extension to Taconian Overthrusting. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 69-70; p. 269-273.

- International Society for Rock Mechanics (2007). The Completed ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring. 628 p.
- St-Julien, P. (1968). Les « Argiles à blocs » du sud-ouest des Appalaches du Québec. Le Naturaliste Canadien, Vol. 95; p. 1345-1356.
- St-Julien, P. (1979). Structure et stratigraphie des roches de la plate-forme et des séquences appalachiennes près de Québec. Ass. Géol. Du Canada, Excursion A-9, Université Laval, Québec, 34 p.
- St-Julien, P., (1995). Géologie de la région de Québec. Ministère des Ressources Naturelles, Secteur des mines, MB-94-40.
- St-Julien, P. Ann Hubert, C. (1975). Evolution of the Taconian Orogen in the Quebec Appalachians. American Journal of Science, Vol. 274-A, p. 337-362.
- St-Julien, P., Slivitsky, A. Ann Feininger, T. (1983). A deep structural profile across the Appalachians of southern Quebec. In Contributions to the Tectonics and Geophysics of Mountain Chains. Geological Society of America, Memoir 158, p. 103-111.
- Szwedzick, T. (2007). A Hypothesis on Modes of Failure of Rock Samples Tested in Uniaxial Compression. Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol. 40, P.97-104.
- Tavallali, A. Ann Vervoort, A. (2013). Behavior of layered sandstone under Brazilian test conditions: Layer orientation and shape effects. Journal of Rock Mechanics Ann Geotechnical Engineering, Vol. 5, p. 366-377.