

ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Juin 2014

Ajout d'un turbogénérateur
Usine Domtar, Windsor (Québec)



N/Réf. : F1417238-001



SMⁱ

LABO S.M. INC.

3350, boul. Gene-H-Kruger
Trois-Rivières (Québec) G9A 4M3
Tél. : 819 375.4401 | Téléc. : 819 375.6294



SMⁱ

LABO S.M. INC.

Étude géotechnique

Ajout d'un turbogénérateur
Usine Domtar, Windsor (Québec)

Rapport présenté à :

Monsieur Vincent Pomerleau, ing.
Ingénieur de projets – Services techniques
DOMTAR
609, Rang 12, C.P. 1010
Windsor (Québec) J1S 2L9

Karine Minguy, ing., OIQ 145947
Chargée de projet – Géotechnique

Sonya Graveline, ing., OIQ 116692
Chef de service – Géotechnique

N/Réf. : F1417238-001
V/Réf. : 95610
Juin 2014



Table des matières

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	MANDAT ET PORTÉE DE L'ÉTUDE	1
1.2	LOCALISATION ET DESCRIPTION DU SITE.....	2
1.3	DESCRIPTION DU PROJET	3
2	TRAVAUX RÉALISÉS	4
2.1	TRAVAUX EN CHANTIER	4
2.1.1	<i>Implantation, localisation et nivellement</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Forages verticaux.....</i>	<i>5</i>
2.1.3	<i>Tube d'observation.....</i>	<i>6</i>
2.1.4	<i>Préparation du forage pour le levé géophysique de type downhole</i>	<i>6</i>
2.1.5	<i>Levé géophysique de type downhole</i>	<i>6</i>
2.1.6	<i>Sondage électrique</i>	<i>6</i>
2.2	TRAVAUX EN LABORATOIRE	6
2.2.1	<i>Laboratoire géotechnique</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Laboratoire d'environnement</i>	<i>7</i>
3	RÉSULTATS DES INVESTIGATIONS.....	8
3.1	STRATIGRAPHIE	8
3.2	ANALYSES CHIMIQUES DES SOLS	11
3.3	VITESSES SISMIQUES.....	13
3.4	RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES SOLS.....	13
3.5	Eaux SOUTERRAINES.....	14
4	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	15
4.1	RÉSUMÉ DU PROJET ET DES CONDITIONS DU SITE.....	15
4.2	STABILITÉ DES OUVRAGES	16
4.3	FONDACTIONS SUPERFICIELLES (BÂTIMENT).....	16
4.3.1	<i>Préparation des assises des fondations</i>	<i>16</i>
4.3.2	<i>Excavation et contrôle des eaux souterraines.....</i>	<i>17</i>
4.3.3	<i>Remblais contrôlés (sous les fondations)</i>	<i>18</i>
4.3.4	<i>Coussin de propreté.....</i>	<i>18</i>
4.3.5	<i>Résistance géotechnique</i>	<i>18</i>
4.3.6	<i>Remblayage des murs extérieurs et drainage permanent</i>	<i>19</i>
4.3.7	<i>Paramètres de conception des murs de fondation</i>	<i>20</i>
4.4	DALLE SUR SOL (BÂTIMENT)	21
4.4.1	<i>Préparation des assises</i>	<i>21</i>
4.4.2	<i>Remblais contrôlés (sous la dalle).....</i>	<i>21</i>
4.4.3	<i>Paramètres géotechniques des sols de remblais sous dalle.....</i>	<i>21</i>
4.4.4	<i>Protection des ouvrages existants.....</i>	<i>22</i>



4.5	FONDATEMENTS PROFONDES (TURBOGÉNÉRATEUR).....	22
4.5.1	<i>Paramètres géotechniques du roc</i>	22
4.5.2	<i>Capacité axiale des pieux</i>	23
4.5.3	<i>Capacité latérale des pieux</i>	25
4.5.4	<i>Effet de groupe</i>	25
4.5.5	<i>Potentiel de corrosion</i>	26
4.5.6	<i>Suivi de construction</i>	26
4.5.7	<i>Essais de chargement</i>	27
4.6	POTENTIEL D'EXPOSITION DU BÉTON AUX SULFATES	27
4.7	RÉUTILISATION DES MATÉRIAUX EN PLACE	27
4.8	ASPECT SISMIQUE	28
4.9	PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES.....	28
4.10	SUIVI DE CONSTRUCTION	28
5	PERSONNEL	29
6	LIMITATIONS	29

Annexes

Annexe I	Localisation du site à l'étude Localisation des forages
Annexe II	Rapports de forage
Annexe III	Rapports d'analyses en laboratoire de géotechnique
Annexe IV	Résultats des analyses chimiques et certificats
Annexe V	Rapport de Géophysique GPR International Inc.



Tableaux

Tableau 1	Coordonnées des points de forage	5
Tableau 2	Programme d'analyses géotechniques	7
Tableau 3	Programme d'analyses environnementales.....	7
Tableau 4	Synthèse de la stratigraphie	10
Tableau 5	Résultats des analyses en laboratoire sur les sols	10
Tableau 6	Résultats des analyses en laboratoire sur le roc (conditionnement à sec)	10
Tableau 7	Résultats des analyses chimiques pour les Sulfates	12
Tableau 8	Vitesses sismiques (V_p et V_s).....	13
Tableau 9	Résistivité apparente (ρ_a).....	14
Tableau 10	Profondeur des eaux souterraines	14
Tableau 11	Paramètres géotechniques des matériaux – soutènement temporaire.....	17
Tableau 12	Valeurs de résistance géotechnique – fondations superficielles (bâtiment).....	19
Tableau 13	Paramètres géotechniques du matériau de remblais des murs de fondation	20
Tableau 14	Coefficients de friction à l'interface béton-roc et béton-remblais	22
Tableau 15	Paramètres géotechniques du roc	22
Tableau 16	Exigences pour les bétons exposés aux sulfates (catégorie S-2)	27



1 INTRODUCTION

1.1 MANDAT ET PORTÉE DE L'ÉTUDE

Les services de **Labo S.M. inc.** ont été retenus par **Domtar**, afin d'effectuer une étude géotechnique dans le cadre du projet d'ajout d'un turbogénérateur à l'usine située au 609 du Rang 12 à Windsor, Québec.

Le mandat spécifique de cette étude géotechnique consistait à déterminer la nature et certaines propriétés des sols et du roc en place et les conditions d'eaux souterraines, et ce, dans la mesure où ces caractéristiques affectent la conception et la construction de l'ouvrage projeté.

Le mandat contenait également un volet environnemental, qui consistait à connaître le degré de contamination des remblais présents au droit du site à l'étude en vue de leur gestion au moment de leur excavation. La démarche environnementale utilisée dans la présente étude est basée sur la norme canadienne CAN/CSA-2769-00 et sur la procédure énoncée dans le *Guide de caractérisation des terrains* (2003) du MDDELCC.

Ce rapport présente une description du site et du projet, la méthodologie utilisée lors des travaux de chantier et en laboratoire, les résultats obtenus de même que nos conclusions et recommandations concernant :

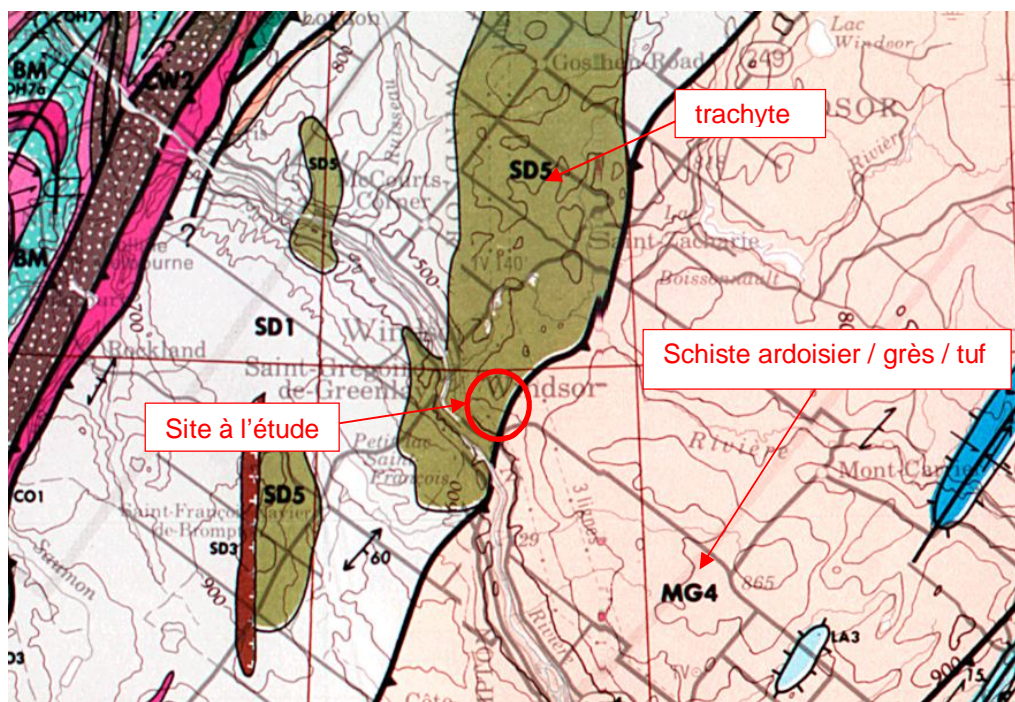
- la stabilité des ouvrages
- le choix du type de fondations
- les conditions d'excavation
- la stabilité des parois d'excavation
- le contrôle des eaux souterraines en cours de travaux
- le drainage
- la mise en place des nouveaux remblais
- la préparation des assises des fondations et des dalles sur sol
- les paramètres de résistance géotechnique et la catégorie d'emplacement sismique selon le *Code national du bâtiment* (CNB) 2005
- les paramètres géotechniques pour le dimensionnement des fondations profondes
- la capacité des pieux
- la réutilisation des matériaux en place
- la protection des ouvrages existants
- la supervision durant la construction.



1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DU SITE

Le terrain à l'étude est situé dans l'enceinte de l'usine **Domtar**, à environ 200 mètres au Nord du poste d'accueil de l'usine. Il représente une superficie de l'ordre de 1 000 m² et présente une topographie plane. Le site est recouvert de matériaux granulaires. Selon les informations obtenues du client, des remblais de roc dynamité d'une épaisseur indéterminée sont présents sur le site.

Selon la *Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce (MM 85-04)*, le site à l'étude serait situé dans la formation de Saint-Daniel. Cette formation géologique est constituée notamment de grès, de roches volcaniques, de granite, de gabbro et de serpentinite. Plus précisément, dans les environs de Windsor, des affleurements de trachyte (roche volcanique) seraient observés.





1.3 DESCRIPTION DU PROJET

Le projet consiste en la construction d'un nouveau bâtiment qui servira à accueillir un turbogénérateur. Les caractéristiques des ouvrages obtenues par le concepteur du projet (**PÖRYR Montréal inc.**) sont les suivantes :

- Bâtiment (incluant les tours de refroidissement situées sur le toit)
 - dimensions de 25 m x 23 m
 - dalle du rez-de-chaussée projetée au niveau du terrain actuel, aucun sous-sol prévu
 - charges maximales de 2 950 kN par colonne
 - sollicitation de la dalle : chariot élévateur (108 kN/essieu), *H-20 loading* (142 kN/essieu)

- Turbine / génératrice / fondation
 - la turbine et la génératrice sont installées sur la fondation
 - fondation = plateau monté sur six (6) empattements qui reposent sur une dalle sur sol
 - dimensions de la dalle de 5 m x 13 m
 - charges de 15 000 kN
 - génère d'importantes vibrations.

Précisons que le système turbine / génératrice / fondation est complètement indépendant du bâtiment, bien qu'il soit situé à l'intérieur de celui-ci.

Selon les informations transmises par le concepteur affecté au projet, le niveau projeté des fondations du bâtiment se situera à une profondeur suffisante pour offrir une protection adéquate contre le gel. Ainsi, elles se situeront à une profondeur de l'ordre de 1,5 m de la surface du terrain actuel, à l'élévation géodésique 198,5 m. Quant à la fondation du turbogénérateur, la dalle reposera au niveau actuel du terrain, soit à l'élévation $\pm 200,0$ m.



2 TRAVAUX RÉALISÉS

2.1 TRAVAUX EN CHANTIER

Les travaux d'investigation sur le terrain ont été effectués entre le 15 et le 22 mai 2014. Ils ont consisté en la réalisation :

- de deux (2) forages verticaux avec échantillonnage des sols et du roc, identifiés TF-01-14 à TF-02-14 et situés dans l'emprise du bâtiment projeté
- de l'installation d'un (1) tube d'observation de la nappe d'eau souterraine dans le forage TF-01-14 et relevé du niveau d'eau stabilisé
- de l'installation d'un (1) tube en pvc bétonné dans le forage TF-02-14, préparatoire au levé géophysique de type *downhole*
- d'un (1) levé géophysique de type *downhole* dans le forage TF-02-14
- d'un sondage électrique dans le forage TF-02-14
- d'un relevé de localisation et de nivellement des forages.

Tous les travaux de terrain ont été réalisés sous la supervision constante d'un technicien expérimenté. Les renseignements recueillis sont présentés dans les rapports de forage inclus à l'annexe II.

Les résultats du levé géophysique et du sondage électrique sont présentés dans le rapport de **Géophysique GPR International inc.** inclus à l'annexe VI.

2.1.1 IMPLANTATION, LOCALISATION ET NIVELLEMENT

L'implantation et le relevé de localisation des points de forage sur le terrain ont été réalisés par le personnel de **Labo S.M. inc.**, à partir des plans fournis par le concepteur et en fonction des indications données par le client quant au positionnement des infrastructures souterraines.

Le relevé de nivellement des points de forage a également été réalisé par le personnel de **Labo S.M. inc.** Le repère de nivellement utilisé, dont l'élévation géodésique est de 199,77 m, correspond au regard d'égout pluvial situé au Sud-Ouest du site à l'étude, à proximité de la porte n° 133. Toutes les élévations mentionnées dans ce rapport sont géodésiques.

Le système de référence utilisé pour les coordonnées X.Y des points de forage est un système arbitraire dédié à l'usine **Domtar**.



Les coordonnées des points de forage relevés sont indiquées au tableau 1 :

Tableau 1 Coordonnées des points de forage

Sondage n°	X (mètres)	Y (mètres)	Z (mètres)
TF-01-14	2119	4859	200,12
TF-02-14	2107	4850	199,86

La localisation des forages réalisés est présentée sur la figure jointe à l'annexe I.

2.1.2 FORAGES VERTICAUX

Les forages verticaux ont été effectués à l'aide d'une foreuse hydraulique de marque Longyear, modèle BK-51, ainsi qu'une foreuse hydraulique de marque Diedrich, modèle D-50, toutes deux (2) installées sur une remorque, en utilisant des tarières évidées de 89 mm de diamètre intérieur et des tubages de calibre NW de 89 mm de diamètre extérieur et 76 mm de diamètre intérieur enfoncées par battage et par rotation. Les forages géotechniques ont atteint une profondeur variant entre 10,1 m et 11,0 m.

Durant les forages dans les sols, un échantillonnage remanié des dépôts meubles a été réalisé en continu. Un carottier fendu normalisé de calibre « B » de 51 mm de diamètre extérieur a été utilisé pour l'échantillonnage des sols et la réalisation d'essais de pénétration standards, tel que défini dans la norme ASTM D-1586. Ces essais permettent la mesure de l'indice « N_{spt} », lequel est relié à la densité du sol, et peut être utilisé pour estimer ses paramètres de résistance au cisaillement.

Pour le volet environnemental, des échantillons de sols de remblais ont été prélevés et conservés selon les recommandations du MDDEFP. Les cuillères fendues ont été nettoyées selon la procédure de lavage des outils d'échantillonnage des sols. Cette procédure consiste à rincer l'échantillonneur avec de l'eau propre, à le laver dans l'eau contenant du détergent, à le rincer avec de l'eau propre et à le rincer de nouveau avec de l'eau distillée. Puis, pour éviter tout transfert de contamination d'un échantillon à l'autre, l'échantillonneur a été rincé à l'acétone, puis à l'hexane et de nouveau avec de l'acétone pour assécher le tout.

À moins qu'un horizon spécifique ne présente les caractéristiques d'une forte contamination, l'échantillonnage a été réalisé pour chaque unité stratigraphique en constituant un composite des sols rencontrés dans chaque cuillère fendue prélevée, d'une longueur de 0,60 m. Cette procédure d'échantillonnage permet d'obtenir un portrait environnemental plus représentatif de chacune des unités rencontrées. Chaque échantillon prélevé a fait l'objet d'un examen organoleptique (odeur, texture, couleur, etc.) par un spécialiste en environnement. Au total, trois (3) échantillons de sols et un (1) duplicata de terrain ont été prélevés dans le forage réalisé. Selon les procédures d'échantillonnage recommandées, les échantillons prélevés ont été insérés dans des contenants de verre fournis par le laboratoire pour conservation et transport au laboratoire. Ces contenants clairement identifiés ont par la suite été placés dans une glacière avec des sachets réfrigérants ou de la glace pour être conservés à une température adéquate (< 4 °C) pendant le transport au laboratoire d'analyse accrédité par le CEAEQ.

Le socle rocheux a été échantillonné à l'aide d'un carottier à doubles parois de calibre « NQ » ayant un diamètre du trou de 75,7 mm et un diamètre des carottes de 47,7 mm. Les cailloux et les blocs ont été



échantillonnés à l'aide d'un carottier à simple paroi de calibre « NX » ayant un diamètre du trou de 75,7 mm et un diamètre des carottes de 54,7 mm.

La mesure de l'indice de qualité du roc (RQD) a été effectuée directement au chantier par le technicien affecté au projet et elle a été validée en laboratoire par l'ingénieur géotechnicien.

2.1.3 TUBE D'OBSERVATION

Un tube d'observation de la nappe d'eau souterraine a été installé dans le forage TF-01-14. Ce tube est constitué d'un tuyau de plastique de 19 mm de diamètre intérieur, dont la partie inférieure est perforée. Il permet de déterminer le niveau de la nappe d'eau libre qui s'écoule dans les sols.

Le schéma d'installation du tube d'observation est illustré sur le rapport de forage inclus l'annexe II.

2.1.4 PRÉPARATION DU FORAGE POUR LE LEVÉ GÉOPHYSIQUE DE TYPE *DOWNHOLE*

Le forage TF-02-14 a été préparé afin de pouvoir effectuer le levé géophysique de type *downhole*. Cette préparation consiste essentiellement en la mise en place d'un tube de PVC plein de 50 mm de diamètre dans le trou du forage et au scellement du trou (entre les parois extérieures du tube et les parois intérieures du forage) par un mélange de ciment-bentonite dans une proportion 2 : 1.

2.1.5 LEVÉ GÉOPHYSIQUE DE TYPE *DOWNHOLE*

Le levé géophysique de type *downhole* a été effectué le 22 mai 2014. Il a consisté en la mesure des vitesses des ondes de compression (V_p) et de cisaillement (V_s) dans le forage TF-02-14 sur une profondeur de l'ordre de 10,0 m. Tous les travaux de terrain ont été réalisés sous la supervision constante de l'équipe technique de **Géophysique GPR International inc.**, mandaté par nos services. La méthodologie de ce levé de terrain, sa localisation et le rapport d'interprétation des données sont présentés à l'annexe VI.

2.1.6 SONDAGE ÉLECTRIQUE

Le sondage électrique a été réalisé au même moment que le levé géophysique, soit le 22 mai 2014, et sous la supervision constante de la même équipe technique. Il a consisté à mesurer la résistivité apparente (ρ_a) des sols au droit du site à l'étude. Le centre de la ligne de sondage a été positionné vis-à-vis le forage TF-02-14. La méthodologie de ce sondage, sa localisation et le rapport d'interprétation des données sont présentés à l'annexe VI.

2.2 TRAVAUX EN LABORATOIRE

2.2.1 LABORATOIRE GÉOTECHNIQUE

Les échantillons de sols et de roc récupérés lors des forages ont été acheminés à notre laboratoire et ont été soumis à une identification visuelle par un ingénieur géotechnicien afin de tracer les profils stratigraphiques présentés dans les rapports de forage. Afin de préciser la nature et certaines



propriétés physiques et mécaniques des sols et du roc échantillonnés, les essais donnés au tableau 2 ont été réalisés sur des échantillons représentatifs.

Tableau 2 Programme d'analyses géotechniques

Quantité	Analyse	Norme
2	Analyse granulométrique par tamisage	LC 21-040
1	Teneur en eau naturelle (w)	LC 21-200
4	Résistance en compression uniaxiale sur carotte de roc (à sec)	ASTM D 7012

Les résultats des essais en laboratoire sont joints à l'annexe III.

Tous les échantillons récupérés lors des forages et qui n'ont pas été utilisés pour les essais de laboratoire seront conservés jusqu'au 16 novembre 2014. Après ce délai, ils seront détruits, à moins d'un avis contraire écrit de votre part.

2.2.2 LABORATOIRE D'ENVIRONNEMENT

Au total, quatre (4) échantillons de sols, soit trois (3) échantillons et un (1) duplicata, ont fait l'objet d'analyses chimiques, lesquelles ont été effectuées par *Les Laboratoires d'analyses S.M. inc.* (N°298) accrédités par le MDDELCC. Les méthodes d'analyses utilisées sont présentées dans les certificats d'analyses joints à l'annexe IV. Les paramètres hydrocarbures pétroliers (HP C₁₀ à C₅₀), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les métaux (14) ont été retenus pour les analyses. Le choix des différents paramètres à analyser pour la caractérisation des sols a été dicté par le fait qu'il s'agisse d'une caractérisation sommaire des matériaux de remblais et qu'ils doivent couvrir les principaux contaminants généralement rencontrés dans les remblais. De plus, le paramètre sulfate a été retenu, puisque leur présence dans les sols pourrait altérer le béton des ouvrages projetés.

Le programme d'analyses en fonction des paramètres analysés se détaille comme suit :

Tableau 3 Programme d'analyses environnementales

Quantité	Paramètre
4	Hydrocarbures pétroliers HP C ₁₀ à C ₅₀
3	Hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP
3	Métaux (14)
3	Sulfate (PNA)

Les certificats d'analyses chimiques ainsi qu'un tableau sommaire des résultats sont fournis aux annexes IV et V. Les certificats d'analyses chimiques présentent également les résultats du contrôle de la qualité interne effectué par le laboratoire.



3 RÉSULTATS DES INVESTIGATIONS

3.1 STRATIGRAPHIE

Les informations recueillies lors des investigations sur le terrain et en laboratoire sont présentées dans les paragraphes suivants et résumées dans les tableaux 4 à 6.

- **Remblais granulaires**

Les forages ont été initiés à partir des remblais granulaires qui recouvrent le site à l'étude. Ces matériaux sont constitués de sable et gravier contenant des traces de silt et sont de couleur brun-gris. Les granulats correspondent à un mélange de gravier brut, gravier concassé et pierre concassée, dont le calibre n'excède pas 30 mm.

La compacité des remblais granulaires est qualifiée de très dense, avec des indices « N_{spt} » mesurés supérieurs à 55. Toutefois, les valeurs mesurées peuvent être surestimées en raison de la fraction graveleuse importante contenue dans ces matériaux.

L'épaisseur de cette couche est de 0,7 m et 1,4 m dans les forages TF-01-14 et TF-02-14 respectivement.

Au droit du forage TF-01-14 uniquement, un remblai composé de sable silteux brun contenant des traces de gravier a été traversé sous les remblais granulaires, sur une épaisseur de 0,5 m. Ce remblai est de compacité moyenne (indice « N_{spt} » de 22).

- **Remblais de roc dynamité**

Une couche de remblais de roc dynamité a été mise en place au droit du site à l'étude. Il a été possible d'échantillonner la partie supérieure de ces remblais à l'aide de cuillères fendues dans le forage TF-02-14; les sols se décrivaient alors comme étant des fragments de roc angulaires d'un calibre d'environ 20 à 40 mm, de couleur noire, avec des traces à un peu de sable et silt. Autrement, ces remblais ont été échantillonnés à l'aide d'un carottier, témoignant de la présence importante de cailloux et de blocs. De ce fait, le diamètre maximal des blocs observés était de 750 mm.

Ainsi, selon notre connaissance des remblais typiquement présents sur le site de l'usine **Domtar** et en fonction de nos observations faites dans les forages, nous pouvons supposer que ces remblais sont constitués de fragments de roc, dont les granulométries correspondent à de graviers, cailloux et blocs dans une matrice plus fine de sable et silt. La granulométrie est parfois mal distribuée en ce sens qu'à certains endroits la proportion en cailloux et blocs peut être très importante, tandis qu'à d'autres endroits les matériaux sont plus fins et contiennent peu de blocs.

Il n'est pas possible de qualifier la compacité de ces remblais étant donné l'impossibilité de procéder aux essais de pénétration standard dans ce type de dépôt.



L'épaisseur de la couche de remblais de roc dynamité est de 2,2 m dans le forage TF-01-14 et 1,6 m dans le forage TF-02-14.

- **Dépôts naturels**

Les dépôts naturels ont été atteints immédiatement sous les remblais de roc dynamité, entre 3,0 m et 3,4 m de profondeur (niveaux 197,1 m à 196,5 m). Ils se décrivent comme étant un till composé de sable et silt à silteux, contenant un peu de gravier. Ils sont de couleur gris-brun à grise. Les résultats d'une analyse granulométrique réalisée sur un échantillon représentatif de ce dépôt démontrent la prédominance sableuse (43 %) et des proportions semblables de silt (33 %) et de gravier (24 %).

La compacité des sols naturels est qualifiée de dense, sur la base d'un seul indice « N_{spt} » mesuré dans le forage TF-01-14 qui était de 53. Il demeure donc possible d'observer une certaine variabilité au niveau de la compacité du dépôt en d'autres endroits.

L'épaisseur du dépôt de sols naturels est de 0,6 m dans le forage TF-01-14 et d'à peine 0,2 m dans le forage TF-02-14.

- **Roc**

Le roc a été intercepté à une profondeur de 4,0 m et 3,2 m dans les forages TF-01-14 et TF-02-14 respectivement, ce qui correspond aux niveaux 195,9 m et 196,9 m. Le massif rocheux se décrit comme étant une roche volcanique de type trachyte, de couleur gris foncé, et présentant de nombreuses veinules millimétriques de calcite. Au droit du forage TF-01-14 uniquement, une schistosité est observée entre 5,2 m et 7,8 m de profondeur ainsi que deux (2) brèches d'une épaisseur de 25 mm et 225 mm.

Des discontinuités ont été notées à plusieurs endroits le long des échantillons prélevés. Ces discontinuités sont d'un pendage variant entre 15° et 55° et sont qualifiées de très serrées à espacées avec un espacement compris entre 10 mm et 820 mm. Aucun vide ou perte d'eau n'a été noté en cours de forage. À noter que dans la partie supérieure du massif rocheux dans le forage TF-02-14, soit entre 3,2 m et 6,0 m de profondeur, les discontinuités présentent un pendage plutôt subvertical.

La masse rocheuse est qualifiée de moyenne à excellente qualité avec un indice RQD (indice de qualité du roc) généralement compris entre 67 et 100. Plus localement, entre 7,8 m et 9,0 m de profondeur dans le forage TF-01-14, le roc est de mauvaise qualité, avec un indice RQD de 30. De plus, la partie supérieure du massif rocheux dans le forage TF-01-14 sur 0,8 m d'épaisseur est de très mauvaise qualité et le roc est considéré comme étant fracturé, avec des lits d'une épaisseur inférieure à 100 mm et un RQD de 0. À noter que lors de l'évaluation du paramètre RQD, les plans de clivage ou les discontinuités saines (non altérées) ne sont pas considérés.

Le roc est qualifié d'assez dur avec une dureté de 5,5 sur l'échelle des duretés relatives de Mohs.

La résistance du roc est qualifiée de très forte avec une résistance en compression simple comprise entre 128 MPa et 209 MPa obtenue sur quatre (4) échantillons représentatifs du massif rocheux.

Les deux (2) forages ont été interrompus dans le roc sain entre 10,1 m et 11,0 m de profondeur.



Tableau 4 Synthèse de la stratigraphie

Forage n°	Élévation surface (m)	Remblais granulaires	Remblais de roc dynamité	Dépôt naturel sablo-silteux		Roc fracturé		Roc	
		Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)	Prof. (m)	Élév. (m)	Prof. (m)	Élév. (m)	Prof. (m)	Élév. (m)
TF-01-14	199,86	1,22	2,18	3,40	196,46	4,01	195,85	4,78	195,08
TF-02-14	200,12	1,40	1,60	3,00	197,12	-	-	3,18	196,94

Tableau 5 Résultats des analyses en laboratoire sur les sols

Forage n°	N° échantillon	Profondeur (m)	Unité stratigraphique	Teneur en eau (%)	Répartition granulométrique (%)		
					Gravier (Ø > 5 mm)	Sable (5 mm > Ø > 80 µm)	Silt et argile (Ø < 80 µm)
TF-01-14	CF-1	0,0 – 0,6	Remblais granulaires	n/a	43,0	44,6	12,4
TF-02-14	CF-9	3,4 – 4,0	Dépôt naturel	9,9	24,0	43,2	32,8

Tableau 6 Résultats des analyses en laboratoire sur le roc (conditionnement à sec)

Forage n°	N° échantillon	Profondeur (m)	Résistance en compression uniaxiale (MPa)
TF-01-14	CR-14	6,6 – 6,7	127,6
	CR-17	9,1 – 9,6	175,1
TF-02-14	CR-8	4,0 – 4,2	208,8
	CR-11	7,5 – 7,6	200,6



3.2 ANALYSES CHIMIQUES DES SOLS

Dans le cadre de la présente étude, les résultats d'analyses en laboratoire pour les paramètres HP C₁₀ à C₅₀, HAP et métaux (14) ont été comparés aux critères génériques (A, B et C) de la *Politique sur la protection et de réhabilitation des terrains contaminés* du MDDELCC, ci-après appelé Politique, ou aux valeurs limites des annexes I et II du *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains* (RPRT). Ces valeurs limites s'appliquent en fonction du zonage tel qu'autorisé par la réglementation municipale et de l'usage (passé, actuel ou prévu du site).

Valeur A : Correspond à ce que l'on appelle le bruit de fond pour les éléments ou les composés inorganiques qui se trouvent de façon naturelle dans le milieu et à la limite de la détection analytique en ce qui concerne les produits chimiques organiques. Pour ce projet, les critères retenus correspondent à la province géologique des basses terres du Saint-Laurent.

Valeur B / Annexe I : L'annexe I du RPRT précise les valeurs limites applicables aux propriétés à vocation résidentielle et à certaines propriétés à vocation publique (ex. : aires de jeu dans un parc municipal) ou institutionnelle (école, CPE, garderie, centre hospitalier, CHSLD, centre de réadaptation, centre de protection de l'enfance et de la jeunesse, établissements de détention). Ces valeurs limites indiquent un seuil à partir duquel on devrait approfondir les analyses afin de cerner la contamination et de procéder, si nécessaire, à des travaux de réhabilitation.

Valeur C / Annexe II : Précise les valeurs limites applicables aux propriétés à vocation industrielle et commerciale de même qu'à certaines propriétés à vocation publique (ex. : piste cyclable, parc municipal, en excluant les aires de jeu, etc.) ou institutionnelle (autres que celles mentionnées dans la description de l'annexe I). Ces valeurs limites indiquent le seuil à partir duquel il pourrait y avoir nécessité d'une action corrective, dépendamment du contexte environnemental. Au-dessus des valeurs limites du critère C / annexe II, le sol est sérieusement contaminé et il faut être en mesure de bien cerner le problème, d'en suivre l'évolution et, dans certains cas, de procéder à des travaux de réhabilitation.

Afin de planifier la disposition des sols contaminés, les concentrations ont aussi été comparées aux valeurs limites du *Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés* (Q-2, D-843-2001), ci-après appelé RESC. Ainsi, les sols qui contiennent une ou plusieurs substances, dont la concentration est égale ou supérieure aux valeurs limites fixées à l'annexe I du RESC, ne peuvent être mis dans un lieu d'enfouissement de sols contaminés et doivent donc être acheminés vers un centre de traitement autorisé.

La gestion des sols excavés, s'il y a lieu, sera également soumise à l'article 4 du *Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés* (c. Q-2, r.23.01, ci-après nommé le RSCTSC) et à la grille de gestion des sols contaminés excavés intérimaire de la Politique.



Comme le site à l'étude est à vocation industrielle, les valeurs limites énumérées à l'annexe II du RPRT (critère « C » de la Politique) ont été retenues comme étant les seuils de qualité à respecter pour les sols du site à l'étude.

Les résultats des différentes analyses chimiques réalisées sur les échantillons de sols ont été regroupés sur le tableau présenté à l'annexe IV. Ce tableau indique, le cas échéant, les différents degrés de contamination ainsi que les dépassements des valeurs limites spécifiées dans la réglementation.

Les résultats des analyses chimiques réalisées sur l'échantillon de sols de remblais analysé pour les trois (3) paramètres confirment des concentrations inférieures aux valeurs de la limite de détection analytique (LDA), soit inférieure au critère « A » des critères génériques de la Politique du MDDEFP.

Quant au paramètre sulfate, les résultats ont été comparés aux valeurs de la norme CSA A23.1, afin de déterminer la classe d'exposition du béton aux attaques des sulfates. Les résultats des analyses chimiques pour le paramètre sulfate sont présentés dans le tableau 7 :

Tableau 7 Résultats des analyses chimiques pour les sulfates

Forage n°	N° échantillon	Profondeur (m)	Concentration en sulfate (mg/Kg) (%)	Classe d'exposition
TF-01-14	CF-1A	0 – 0,2	21,0 (0,2%)	S-2
TF-01-14	CF-2B	0,7 – 1,2	15,0 (0,2%)	S-3
TF-02-14	CF-1	0 – 0,6	32,0 (0,3%)	S-2
TF-02-14	DUP	0 – 0,6	34,0 (0,3%)	S-2

Les résultats démontrent des concentrations en sulfate compris entre 0,2 % et 0,3 %, pour une classe d'exposition majoritairement S-2.

Les analyses ont été réalisées en double pour les paramètres HP C₁₀ à C₅₀ et sulfate sur un échantillon de sol duplicata afin de vérifier la reproductibilité des résultats d'analyses en laboratoire. Les résultats obtenus sont similaires.



3.3 VITESSES SISMIQUES

Les vitesses d'ondes sismiques en compression (V_p) et en cisaillement (V_s) des sols et du roc ont été obtenues à l'aide du levé géophysique de type *downhole*. Différentes valeurs sont données en fonction des unités stratigraphiques rencontrées. Le tableau 8 illustre les résultats obtenus :

Tableau 8 Vitesses sismiques (V_p et V_s)

Unité stratigraphique	Profondeur (m)	Vitesse de l'onde sismique de compression « V_p » (m/s)	Vitesse de l'onde sismique de cisaillement « V_s » (m/s)
Remblais granulaires	0,0 – 1,4	778,2	298,8
Remblai de roc dynamité	1,4 – 3,2	778,2	357,4
Roc sain (masse rocheuse)	3,2 – 10,1	3126,3	1908,3

Mentionnons qu'aucune distinction n'a été faite entre le remblai de roc dynamité et le dépôt naturel. Étant donné la très faible épaisseur du dépôt rencontré dans le forage TF-02-14 et sa compacité élevée, cette couche n'est pas ressortie lors de l'interprétation des données.

Les vitesses données pour le roc seront utilisées pour la détermination de certains paramètres dynamiques de conception à la sous-section 4.5.1 du rapport, notamment le coefficient de poisson « ν », le module d'Young « E_{dyn} », le module d'incompressibilité « K_{dyn} » et le module de cisaillement « G_{dyn}^o ».

3.4 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES SOLS

La résistivité apparente (ρ_a) des sols et du roc a été obtenue à l'aide du sondage électrique. Dans ce type de sondage, la profondeur investiguée augmente de façon proportionnelle avec l'incrément de mesure entre les deux (2) électrodes. Or, dans des milieux urbains ou industrialisés, il est fréquent d'obtenir une mauvaise propagation du courant lorsque l'incrément de mesure augmente en raison de la présence d'infrastructures souterraines à proximité du sondage (comme c'est le cas au droit du site à l'étude). Ainsi, les valeurs obtenues pour les dépôts de surface sont relativement exactes, tandis que les valeurs obtenues pour le roc sont fort probablement sous-estimées. Le tableau 9 illustre les résultats obtenus :

**Tableau 9 Résistivité apparente (ρ_a)**

Unité stratigraphique	Profondeurs (m)	Résistivité apparente « ρ_a » (Ohm.m)
Remblais granulaires	0,0 – 1,4	150
Remblai de roc dynamité	1,4 – 3,2	181
Roc sain	3,2 – 10,1	> 770

Mentionnons que les valeurs typiques de résistivité apparente pour une roche volcanique saine semblable à celle en présence au droit du site à l'étude sont plutôt de l'ordre de 1 000 à 10 000 Ohm.m.

3.5 EAUX SOUTERRAINES

Le niveau de la nappe d'eau souterraine a été relevé à l'intérieur du tube d'observation le 16 mai 2014. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 10 ci-dessous :

Tableau 10 Profondeur des eaux souterraines

Forage n°	Élévation de surface (m)	Eaux souterraines (16-05-204)	
		Profondeur (m)	Élévation (m)
TF-01-14	199,86	3,37	196,49

Les eaux souterraines se situaient à 3,4 m de profondeur (niveau 196,5 m), soit à l'interface entre les remblais de roc dynamité et le dépôt naturel.

Les conditions d'eau souterraine rencontrées dans les forages correspondent uniquement aux emplacements et aux dates indiquées et sont données à titre informatif uniquement. Celles-ci sont susceptibles de varier suivant les saisons, l'importance des précipitations locales ou encore par l'intervention humaine sur le site ou les propriétés adjacente. À cet effet, il demeure possible que ces conditions soient différentes lors de la réalisation des travaux de construction.



4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

4.1 RÉSUMÉ DU PROJET ET DES CONDITIONS DU SITE

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de l'ajout d'un turbogénérateur à l'usine Domtar de Windsor, Québec. Le projet englobe la construction d'un bâtiment et l'aménagement de tous les équipements requis pour le bon fonctionnement du turbogénérateur. Les charges du bâtiment sont estimées à 2 950 kN/colonne, tandis que les charges du turbogénérateur et de sa fondation sont de 15 000 kN. De plus, la dalle du bâtiment sera sollicitée par des charges ponctuelles en raison de la machinerie qui y circulera, soit un chariot élévateur (108 kN/essieu) et des camions de type *H-20 loading* (142 kN/essieu). Le niveau des fondations du bâtiment est projeté à 198,5 m (1,5 m de profondeur) et le niveau de la base de la fondation du turbogénérateur est projeté à 200,0 m (en surface).

Les résultats de la campagne de forage ont révélé la présence, en surface, de remblais granulaires de 1,3 m d'épaisseur moyenne constitués de sable et gravier contenant un peu de silt. Ils reposent sur un remblai de roc dynamité d'une épaisseur moyenne de 1,9 m; cet horizon se décrit comme étant des graviers, des cailloux et des blocs dans une matrice de sable et silt, dont les proportions peuvent varier. Le calibre maximal observé des blocs était de 750 mm. Une mince couche de sols naturels a été traversée sous les remblais. Il s'agit de sable silteux et graveleux dense présent sur une épaisseur moyenne de 0,4 m. Le roc a été intercepté entre 3,2 m et 4,0 m de profondeur (niveaux 196,9 m à 195,9 m). Il s'agit de trachyte gris foncé de moyenne à excellente qualité et de très forte résistance. La roche contient des veinules millimétriques de calcite et est assez dure. Les discontinuités sont serrées à espacées, quoique leur espacement est généralement plus rapproché dans le forage TF-01-14 comparativement au forage TF-02-14.

L'échantillonnage environnemental a été effectué dans les sols de remblais. Les résultats des analyses chimiques réalisées révèlent des concentrations inférieures au critère « A » pour les paramètres HP C₁₀ à C₅₀, HAP et métaux (14) et les concentrations en sulfate se situent entre 0,2 et 0,3 %, correspondant à une classe d'exposition S-2.

Le levé géophysique de type *downhole* a mis en évidence des vitesses sismiques d'ondes de compression « V_p » et d'ondes de cisaillement « V_s » de 3 126 m/s et 1 908 m/s respectivement pour le massif rocheux.

Le sondage électrique a permis de déterminer une résistivité apparente « ρ_a » de 150 Ohm.m pour les remblais granulaires et de 181 Ohm.m pour les remblais de roc dynamité. La résistivité apparente du roc n'a pas pu être mesurée avec précision, ainsi elle est estimée à plus de 770 Ohm.m.

Finalement, les eaux souterraines ont été interceptées à une profondeur de 3,4 m (niveau 196,5 m).



4.2 STABILITÉ DES OUVRAGES

Le turbogénérateur représente des charges très importantes (15 000 kN), sans compter les vibrations qu'il occasionnera lors de son opération. Quant aux charges du bâtiment, elles sont également importantes bien qu'amplement inférieures (2 950 kN/colonne). Les résultats des forages mettent en évidence la présence d'environ 3 m de remblais granulaires et de roc dynamité mis en place sur une très mince couche de sols naturels sablo-silteux suivi du roc.

D'une part, il n'est pas recommandé de construire des ouvrages sur des remblais dont la mise en place n'a pas fait l'objet d'un contrôle qualitatif. D'autre part, il existe peu de sols meubles pouvant offrir une résistance géotechnique suffisante pour reprendre des charges aussi élevées que 15 000 kN. Par ailleurs, nous sommes d'avis que même le remblai structural le plus résistant qui soit n'offrirait pas une résistance suffisante pour supporter ces charges. Conséquemment, les charges du turbogénérateur devront être transmises au roc. Considérant la profondeur du roc sain, il a été convenu, à la demande du concepteur, d'exclure les fondations superficielles. Les charges du turbogénérateur seront donc transmises au roc par le biais de fondations profondes.

Quant au bâtiment, ses charges pourront être transmises au roc ou à un remblai structural érigé à partir du socle rocheux par le biais d'un système de fondations superficielles.

4.3 FONDATIONS SUPERFICIELLES (BÂTIMENT)

Les charges du bâtiment pourront être transmises au roc ou encore sur un remblai contrôlé érigé à partir du roc par l'intermédiaire d'empâtements conventionnels.

La profondeur d'enfouissement des fondations doit être d'un minimum de 1,5 m par rapport à la surface finale du terrain afin de les protéger efficacement contre les soulèvements causés par le gel. Toutefois, aux endroits déneigés en permanence, la profondeur de gel pourrait être de 1,8 m. La mise en place d'isolants rigides disposés à l'horizontale pourra être considérée en lieu et place de l'enfouissement prescrit.

4.3.1 PRÉPARATION DES ASSISES DES FONDATIONS

Tous les sols meubles, qu'il s'agisse des remblais actuels ou des dépôts naturels, présents sous le niveau prévu des fondations, devront être entièrement excavés jusqu'à ce que l'assise rocheuse stable soit atteinte partout. L'assise rocheuse devra être nettoyée et exempte de fragments lâches. La surface au niveau de l'assise des fondations devra présenter une pente maximale de 1,0 V : 10,0 H.

Le fond des excavations devra faire l'objet d'une acceptation de la part d'un ingénieur en géotechnique ou son représentant afin de s'assurer que tous les matériaux indésirables aient été enlevés et que les assises soient stables.

Afin de réduire la hauteur des murs de fondations étant donné le niveau intercepté du roc inférieur à celui projeté pour les fondations, la mise en place d'un remblai contrôlé pourra être envisagée. Ce remblai sera mis en place suivant les recommandations décrites à la section 4.3.3.



4.3.2 EXCAVATION ET CONTRÔLE DES EAUX SOUTERRAINES

Les excavations atteindront une profondeur de 4,0 m et seront réalisées essentiellement dans des remblais granulaires ainsi que des remblais de roc contenant des blocs d'un diamètre pouvant atteindre plus de 1,0 m. Le recours à des engins conventionnels pourra être envisagé pour les travaux d'excavation. Le recours à un marteau hydraulique de type « TRAMAC » pourrait également être requis afin de concasser d'éventuels blocs.

Les eaux souterraines se situent sensiblement au même niveau que celui du fond d'excavation projeté, ou encore légèrement au-dessus. Conséquemment, des infiltrations d'eau sont anticipées. Celles-ci, de même que toutes les eaux de précipitation et de ruissellement, devront être évacuées de façon à ce que le fond des fouilles demeure en tout temps bien drainé et stable.

Les conditions de drainage étant respectées, les pentes d'excavation temporaires (moins de 5 jours) ne devront pas excéder 1,2 m verticale pour 1,0 m horizontale (1,2 V : 1,0 H) dans les dépôts meubles. Tous les blocs saillants qui représentent un risque de chute présents en surface des parois d'excavation devront être enlevés manuellement.

Il est important de préserver une bande de protection d'une largeur équivalente à une fois la profondeur de l'excavation entre le sommet du talus et la base des piles de matériaux entreposés. La circulation des véhicules à proximité des tranchées ouvertes doit également se faire à une distance raisonnable de la zone excavée, afin de minimiser l'impact des vibrations sur la stabilité des excavations.

Ces pentes d'excavation sont données à titre indicatif seulement, car, dans la mesure où il s'agit de pentes temporaires, l'entrepreneur seul est responsable de la stabilité des pentes d'excavation ainsi que de la sécurité des travailleurs.

Si le profilage des pentes d'excavation ne peut pas être réalisé, notamment en raison de l'espace restreint ou de toutes autres contraintes, un système de soutènement temporaire conçu et scellé par un ingénieur devra être envisagé. Le système de soutènement temporaire devra être conçu en fonction des particularités géotechniques du site, des conditions des eaux souterraines, des conditions climatiques et de la présence d'ouvrages et d'infrastructures à proximité. Le tableau 11 présente les paramètres géotechniques moyens à considérer pour la conception du système de soutènement temporaire des excavations.

Tableau 11 Paramètres géotechniques des matériaux – soutènement temporaire

Paramètres	Remblais granulaires	Remblais de roc dynamité	Dépôt naturel sablo-silteux
Poids volumique humide des terres (kN/m ³)	21,0	22,0	20,0
Poids volumique déjaugé (kN/m ³)	11,2	12,2	10,2
Angle de frottement interne Φ (°)	33	35	31
Cohésion effective c' (kPa)	0	0	0
Coefficient de poussée active (K_a)	0,29	0,27	0,32



Paramètres	Remblais granulaires	Remblais de roc dynamité	Dépôt naturel sablo-silteux
Coefficient de poussée passive (K_p)	3,39	3,69	3,12
Coefficient des terres au repos (K_o)	0,45	0,42	0,48

Outre ces recommandations, toutes les conditions d'excavation devront être conformes aux normes de la Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST) afin de réaliser les travaux de façon sécuritaire pour les travailleurs.

4.3.3 REMBLAIS CONTRÔLÉS (SOUS LES FONDATIONS)

Les remblais structuraux à mettre en place sous le niveau des fondations devront être composés d'un matériau granulaire de calibre MG-56 fabriqué en carrière. Ces remblais seront érigés par couche de 300 mm et densifiés à plus de 95 % du Proctor modifié.

La montée des remblais doit faire l'objet d'un contrôle qualitatif afin d'en garantir la performance en égard des valeurs de résistance géotechniques recommandées à la section 4.3.5. Compte tenu que les matériaux encaissants offrent un support latéral adéquat et, afin de minimiser l'empiétement à proximité des ouvrages existants, il est possible de restreindre le dégagement latéral à 300 mm et selon une pente de 1,0 H : 2,0 V en lieu et place d'un dégagement de 600 mm et suivant une pente de 1,0 H : 1,0 V. Toutefois, lors de la mise en place des remblais, le contact entre le remblai structural et le sol encaissant devra être étroitement contrôlé par un représentant du laboratoire afin de s'assurer d'un support latéral compact.

4.3.4 COUSSIN DE PROPRETÉ

Pour des fondations prenant appui au niveau du socle rocheux, un coussin de propreté pourra être mis en place afin de procurer une surface horizontale et de faciliter les opérations de coffrages et de mise en place des armatures. Ce coussin devra être constitué d'une couche de béton maigre mise en place sur l'assise rocheuse nettoyée.

Si requis, étant donné les différences d'élévation anticipées quant au niveau de l'assise rocheuse stable, un remblai de béton pourra être coulé en place afin de procurer une surface horizontale. Ce remblai ne devra toutefois pas excéder une épaisseur de 2,0 m.

Aucun coussin n'est requis dans le cas des fondations prenant appui sur les remblais contrôlés.

4.3.5 RÉSISTANCE GÉOTECHNIQUE

Les recommandations qui suivent sont données conformément aux directives du *Code national du bâtiment*, 2005 (CNB 2005). La sous-section 4.1.3 du CNB exige que le calcul des fondations soit réalisé selon la méthode aux états limites. Les états limites demandés dans le CNB, ainsi que ceux calculés dans le cadre de ce projet, sont les suivants :



- les états limites ultimes (ÉLU)
- les états limites de tenue en service (ÉLTS).

Les états limites ultimes (ÉLU) mettent en cause la sécurité et portent principalement sur les mécanismes d'effondrement de la structure causés par l'atteinte des limites de la capacité portante, une rupture, un renversement, un glissement ou une grande déformation des fondations. Les états limites de tenue en service (ÉLTS) correspondent aux mécanismes qui limitent ou empêchent l'usage prévu de la structure, comme les tassements totaux et différentiels.

Les valeurs de résistance géotechnique aux états limites ultimes (ÉLU) ainsi qu'aux états limites de tenue de service (ÉLTS) données au tableau 12 sont recommandées pour le dimensionnement des fondations (semelles carrées) prenant assises conformément aux conditions de mise en place émises dans le présent rapport. Trois (3) types d'assises ont été considérés :

- fondations reposant directement sur l'assise rocheuse
- fondations reposant sur un remblai structural de 2,0 m d'épaisseur
- fondations reposant sur un remblai structural de 4,0 m d'épaisseur

Tableau 12 Valeurs de résistance géotechnique – fondations superficielles (bâtiment)

Largeur de semelles « B » Type d'assise	1,5 m x 1,5 m Assise rocheuse	2,0 m x 2,0 m 2,0 m de remblais	2,5 m x 2,5 m 4,0 m de remblais
ÉLU	14 000 kPa	2 700 kPa	
ÉLU pondéré (coefficient de tenu de 0,5)	7 000 kPa	1 350 kPa	
ÉLTS (tassements totaux inférieurs à 25 mm)	4 500 kPa	780 kPa	475 kPa

4.3.6 REMBLAYAGE DES MURS EXTÉRIEURS ET DRAINAGE PERMANENT

Le remblayage des murs extérieurs à partir de la surface du terrain jusqu'à la ligne de gel établie à 1,5 m de profondeur doit se faire avec un matériau drainant contenant moins de 10 % de particules passant le tamis 80 µm, tel un MG 112 ou un matériau de classe « A ». Ces précautions permettent d'éviter les poussées latérales excessives sur le mur et leur soulèvement par adhérence causés par l'effet du gel des sols fins. Des drains devront être aménagés sur tout le pourtour extérieur des empattements, sous la ligne de gel, afin d'éviter toute accumulation d'eau en périphérie des bâtiments.

Le remblayage inférieur à la ligne de gel (1,5 m) pourra se faire à l'aide d'un remblai granulaire de classe « B » compacté par couche de 300 mm à plus de 90 % du Proctor modifié.



4.3.7 PARAMÈTRES DE CONCEPTION DES MURS DE FONDATION

Les différents paramètres géotechniques à considérer pour la conception des murs de fondation sont donnés au tableau 13, pour un matériau de remblai rencontrant les exigences spécifiées à la section 4.3.6 et compacté à environ 90 % du Proctor modifié :

Tableau 13 Paramètres géotechniques du matériau de remblais des murs de fondation

Paramètre	Remblai granulaire
Poids volumique humide « γ »	18,0 kN/m ³
Angle de frottement interne « ϕ »	31°
Coefficient de pression des terres au repos « K_0 »	0,48
Coefficient de poussée active « K_a »	0,32
Coefficient de butée « K_p »	3,12
Coefficient de frottement entre le matériau de remblai et le mur (béton coulé en place)	0,30

La détermination de la contrainte horizontale induite aux murs par le compactage des sols de remblai se fait suivant la méthode décrite à la section 24.8 du *Manuel canadien d'ingénierie des fondations* (MCIF, 2006). Avec cette méthode, il est prérequis de connaître les spécifications de l'équipement de compactage utilisé. L'équation à utiliser se décrit comme suit :

$$\bar{\sigma}_h = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot \gamma}{\pi}} \cdot \frac{L}{a + L}$$

Où

P = chargement du rouleau (en kN/m) et se définit comme étant la somme du poids propre du rouleau et de la force centrifuge divisée par le poids du rouleau

γ = poids volumique des sols

a = distance du rouleau à partir du mur

L = longueur du rouleau

À noter que la profondeur d'influence « z » de cette contrainte induite est comprise entre la profondeur « z_c » et la profondeur « d », qui se définissent par les équations suivantes :

$$z_c = K_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \gamma}} \quad \text{et} \quad d = \frac{1}{K_a} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \gamma}}$$



4.4 DALLE SUR SOL (BÂTIMENT)

4.4.1 PRÉPARATION DES ASSISES

La dalle de plancher du bâtiment sera appuyée sur des remblais structuraux érigés à partir du socle rocheux. La montée des remblais devra se faire suivant les recommandations émises à la section 4.4.2.

Tous les sols meubles, qu'il s'agisse des remblais ou des dépôts naturels, devront être entièrement excavés jusqu'à ce que l'assise rocheuse stable soit atteinte partout.

Le fond des excavations devra faire l'objet d'une acceptation de la part d'un ingénieur en géotechnique ou son représentant afin de s'assurer que tous les matériaux indésirables aient été enlevés et les assises sont intactes.

4.4.2 REMBLAIS CONTRÔLÉS (SOUS LA DALLE)

Compte tenu des charges qui seront transmises aux remblais par la circulation des camions dans le bâtiment (jusqu'à 142 kN/essieu), les remblais structuraux à mettre en place sous la dalle devront être composés d'un matériau de classe « A » contenant un minimum de 35 % de gravier. Ces remblais seront érigés par couche de 300 mm d'épaisseur, chacune densifiée à plus de 95 % du Proctor modifié.

La montée des remblais devra faire l'objet d'un contrôle qualitatif.

4.4.3 PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DES SOLS DE REMBLAIS SOUS DALLE

Le module de réaction vertical du sol « K_s » permet de définir l'interaction sol-structure entre un radier et les matériaux sous-jacents à la suite d'un chargement. Il ne s'agit pas d'une propriété intrinsèque pour un matériau donné, conséquemment la valeur est difficilement évaluable. À cet effet, la section 7.7.1 du *Manuel canadien d'ingénierie des fondations* (MCIF, 2006) traite du sujet.

Néanmoins, pour des fins de calculs, si la dalle sur sol est armée et conçue comme un radier, nous suggérons de considérer comme valeur typique un module de réaction de 80 MPa/m pour le remblai contrôlé sous dalle. Ce module est une valeur de référence donnée pour une plaque carrée de 300 mm de côté. L'ajustement de cette valeur pour la dalle à concevoir doit être fait suivant l'équation :

$$K_{sb} = K_s \cdot \left(\frac{3,28b + 1}{6,56b} \right)^2$$

où « b » est la largeur, en mètres, de la dalle à concevoir.

Les coefficients de friction « δ » à considérer pour différents types d'interfaces sont donnés au tableau 14. Trois (3) types d'interfaces avec le béton sont présentés, soit pour la dalle du bâtiment qui reposera sur un remblai classe « A » ainsi que pour les semelles de fondations qui reposeront sur le roc ou un remblai MG-56.

**Tableau 14 Coefficients de friction à l'interface béton-roc et béton-remblais**

Type d'interface	Coefficient de friction « δ »
Béton – roc	0,70
Béton – remblais MG-56	0,60
Béton – remblais classe « A »	0,55

4.4.4 PROTECTION DES OUVRAGES EXISTANTS

Si les excavations le long du bâtiment existant atteignent un niveau inférieur à celui des fondations existantes, la mise en place de soutènement temporaire, le creusement de l'excavation par section de largeur limitée, la reprise en sous-œuvre des fondations existantes ou le recours à toute autre méthode jugée acceptable par le concepteur devra être prévu et mis en œuvre pour en assurer la stabilité.

4.5 FONDATIONS PROFONDES (TURBOGÉNÉRATEUR)

Les charges du turbogénérateur seront transmises au roc par l'entremise d'un système de fondations profondes. En considérant la profondeur du roc et l'ampleur des charges devant être appliquées, nous recommandons l'utilisation de pieux tubulaires bétonnés forés dans le roc. Selon les résultats des investigations, la profondeur du roc est estimée entre 3,0 m et 4,0 m (niveaux 195,9 m à 196,9 m).

La longueur de l'emboîture devra être d'au moins deux (2) fois le diamètre du pieu. De plus, puisque la partie supérieure du roc nous est apparue comme étant de très mauvaise qualité dans l'un des forages, nous recommandons à ce que le premier mètre ne soit pas considéré dans les calculs de résistance axiale le long de l'emboîture.

4.5.1 PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DU ROC

Le tableau 15 présente l'ensemble des paramètres géotechniques du roc qui seront requis dans les prochaines sections pour le dimensionnement des pieux.

Tableau 15 Paramètres géotechniques du roc

Paramètre	Roc	Référence
Poids volumique humide « γ_{sat} »	28 kN/m ³	Valeurs typiques pour une roche volcanique
Poids volumique déjaugé « γ »	18,2 kN/m ³	
Geological Strength Index « GSI »	50	Hoek et Marinos, 2000
Module d'Young de la roche intacte « E_i »	27 GPa	Hoek-Brown
Module d'Young du massif rocheux « E_r »	7,2 GPa	



Paramètre	Roc	Référence
Résistance en compression uniaxiale « σ'_c »	130 MPa	Essais en laboratoire
Rock Mass Rating « RMR »	61	Foundations on rock, Duncan C. Whyllie
Coefficient de réaction latéral « K_r »	12/D GPa ⁽¹⁾	Johnston et Lam, 1989
Coefficient de poisson « ν »	0,20	Essais in situ (Géophysique GPR International Inc.)
Module d'Young dynamique « E_{dyn} »	25 GPa	
Module d'incompressibilité « K_{dyn} »	14 GPa	
Module de cisaillement dynamique « G_{dyn} »	10 GPa	
Constante d'amortissement « D »	0,3 à 4 %	Valeurs typiques pour un roc avec un « V_s » < 2 000 m/s

⁽¹⁾ Dépend du diamètre « D » du pieu, exprimé en mètres

4.5.2 CAPACITÉ AXIALE DES PIEUX

En compression

Le calcul de la capacité axiale en compression d'un pieu se fait suivant la 3^e méthode décrite à la section 18.6 du MCIF 2006. En résumé, la capacité axiale en compression est donnée par la somme de la capacité en pointe et en friction le long de l'emboîture, en appliquant un coefficient réducteur « n » qui tient compte de la répartition des contraintes reprises en friction par rapport à celles en pointe.

- Résistance en pointe

Dans un premier temps, il est admis que la résistance ultime en pointe d'un pieu peut être égale à la valeur de résistance géotechnique ultime du roc, laquelle a été calculée à la section 4.3.5 du rapport (présentée dans le tableau 12).

$$q_{ult}(pointe) = 14\,000 \text{ kPa}$$

La capacité ultime sera le produit de cette résistance et de la superficie à la base de l'emboîture.

- Résistance en friction

Puis, la résistance le long de l'emboîture est la plus petite de ces deux valeurs :

$$q_{ult}(friction) = \text{minimum} \left\{ P_a \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_c}{P_a}}; 2,5 \cdot 0,05 \cdot f'_c \right\}$$



où « P_a » est la pression atmosphérique (considérer 103 kPa pour le calcul), « b » est un coefficient empirique (considérer 1,41 pour le calcul) et « f'_c » est la résistance en compression simple du béton utilisé pour le pieu (considérer 32 MPa pour le calcul).

$$q_{ult} (friction) = \text{minimum}\{5\ 150 ; 4\ 000\} = 4\ 000\ kPa$$

La capacité ultime sera le produit de la résistance et de la superficie de contact du système pieu-roc.

- Coefficient réducteur

Finalement, le coefficient de réducteur est déterminé à l'aide de la figure 18.14 du MCIF 2006. Ce coefficient réducteur est fonction de la géométrie de l'emboîture (diamètre et longueur) et du ratio des modules d'Young E_s/E_r (considérer un module d'Young du béton E_c de 27 GPa pour le calcul).

- Exemple de calcul

L'équation suivante, qui résume les énoncés des paragraphes précédents, permet de calculer la capacité axiale ultime d'un pieu en compression :

$$Q_{ult} = n \cdot q_{ult}(\text{pointe}) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + (1 - n) \cdot q_{ult}(\text{friction}) \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

où les unités géométriques (D, L) doivent être exprimées en mètres et les résistances, en kPa, afin que la capacité ultime soit exprimée en kN.

Par exemple, pour un pieu de section circulaire de 600 mm de diamètre avec une emboîture effective de 2 m dans le roc, la capacité ultime sera :

$$Q_{ult} = 0,1 \cdot 14\ 000 \cdot \frac{\pi \cdot (0,6)^2}{4} + (1 - 0,1) \cdot 4\ 000 \cdot \pi \cdot (0,6) \cdot (2) = 396 + 13\ 572 \cong 13\ 950\ kN$$

Un coefficient de tenue de 0,4 doit être utilisé pour obtenir la capacité ultime pondérée en compression.

En tension

La résistance à l'arrachement d'un pieu est mobilisée par la capacité axiale en friction le long de l'emboîture (précédemment déterminée) et le poids du pieu. La capacité axiale ultime en tension sera donnée par l'équation suivante :

$$Q_{ult} = q_{ult}(\text{friction}) \cdot \pi \cdot D \cdot L + \frac{P}{2}$$

où les unités géométriques (D, L) doivent être exprimées en mètres, la résistance, en kPa, et le poids du pieu, en kN, afin que la capacité ultime soit exprimée en kN.

Un coefficient de tenue de 0,3 doit être utilisé pour obtenir la capacité ultime pondérée en tension.



Friction négative

Aucune friction négative n'est anticipée sur les pieux. Les sols meubles de même que le roc ne sont pas susceptibles de subir d'importants tassements qui pourraient engendrer une telle friction.

4.5.3 CAPACITÉ LATÉRALE DES PIEUX

Le calcul de la résistance latérale d'un pieu est relativement complexe et tient compte de plusieurs paramètres, dont certains ne sont pas connus à ce stade-ci du projet. Il existe plusieurs méthodes de calculs; pour des pieux forés dans le roc, nous recommandons de recourir à la méthode des courbes « p-y » (L.C. Reese, 1984), laquelle semble la plus appropriée.

Mentionnons, à titre informatif, que la section 12.3.3.1 du rapport n° *FHWA NHI-10-016* de la *Federal Highway Administration* résume bien l'utilisation de la méthode.

4.5.4 EFFET DE GROUPE

Dans l'éventualité où un groupe de pieux est installé, le comportement du groupe de pieux doit être analysé et la notion d'efficacité entre en ligne de compte. En résumé, l'efficacité d'un groupe de pieux se traduit par le fait que la capacité totale du groupe est inférieure à la somme des capacités individuelles de chacun des pieux compris dans ce groupe. Ceci s'explique en raison des zones d'influence des pieux qui se chevauchent lorsqu'ils sont trop près.

Capacité axiale

Nous recommandons à ce que l'effet de groupe soit considéré pour les calculs de résistance axiale des pieux si l'espacement centre-centre entre deux (2) pieux devient inférieure à 4x leur diamètre. Toutefois, il est déconseillé d'installer des pieux avec un espacement de moins de 3x leur diamètre (centre-centre) puisque les opérations de mise en place pourraient altérer les propriétés du béton et des sols et/ou du roc.

La capacité totale d'un groupe de pieux se calcule en modélisant ce dernier comme étant un gros pieu de section rectangulaire de dimensions équivalentes à l'espace qu'il occupe, en considérant sa résistance en pointe et le long du fût. L'équation de la capacité axiale du groupe de pieux en compression est donc la suivante :

$$Q_{ult}(groupe) = q_{ult}(friction) \cdot [2 \cdot (Z + B) \cdot D] + q_{ult}(pointe) \cdot [Z \cdot B]$$

où « D », « Z » et « B » sont respectivement la profondeur, la longueur et l'épaisseur du bloc monolithique, exprimées en mètres, et les résistances « $q_{ult}(friction)$ » et « $q_{ult}(pointe)$ » ont été déterminées à la section 4.5.2.

Le coefficient d'efficacité « η » sera ensuite déterminé par le quotient de la résistance du groupe de pieux et de la sommation des résistances individuelles des pieux du groupe. Il se traduit par l'équation :

$$\eta = \frac{Q_{ult}(groupe)}{\sum_{i=1}^n Q_{ult} n_i}$$



Mentionnons que l'effet de groupe a généralement peu d'influence pour des pieux forés dans le roc et que les tassements qui y sont associés sont négligeables.

Capacité latérale

Nous recommandons à ce que l'effet de groupe soit considéré pour les calculs de résistance latérale des pieux si l'espacement centre-centre entre deux (2) pieux devient inférieure à 6x leur diamètre. La capacité et la déformation latérale d'un pieu seront alors plus importantes lorsque celui-ci fait partie d'un groupe de pieux que lorsqu'il est seul et son emplacement relatif dans le groupe de pieux aura une incidence sur son comportement dans le groupe.

Le concept du facteur « P-multiplier » (Brown et Al., 1987) peut être appliqué pour calculer l'effet de groupe et s'intègre à la méthode des courbes « p-y ». Ce facteur est propre à chaque pieu du groupe et tient compte de l'apport de charge latérale causé par le mouvement des pieux voisins.

Mentionnons, à titre informatif, que la section 14.5.1 du rapport n° *FHWA NHI-10-016* de la *Federal Highway Administration* résume bien l'utilisation de la méthode.

4.5.5 POTENTIEL DE CORROSION

La corrosion excessive de l'acier dont sont constitués les pieux se produit dans les sols relativement acides ($\text{pH} < 4$), dans une zone située immédiatement au-dessus de la nappe phréatique. Or, le site à l'étude ne rencontre pas ces caractéristiques. Conséquemment, le potentiel de corrosion de l'acier sera négligeable. Afin de tenir compte du potentiel de corrosion « normal » lors du dimensionnement, nous recommandons de soustraire 1 mm à l'épaisseur de la paroi.

4.5.6 SUIVI DE CONSTRUCTION

La méthode de mise en place des pieux se doit d'être étroitement surveillée afin de s'assurer que les pieux développent le maximum de leur capacité.

L'étanchéité du système pieu-roc devra être vérifiée au préalable du nettoyage des emboîtures, afin d'éviter le lessivage des sols meubles présents à l'interface du roc. Le nettoyage proprement dit devra permettre d'obtenir une surface rugueuse et nette, exempte de fragments de roc, de cailloux, de gravier ou de terre. Le nettoyage sera terminé lorsque l'eau sortant du tubage sera claire.

Nous recommandons à ce que chaque emboîture fasse l'objet d'une inspection télévisuelle au cours de laquelle il sera possible de valider la qualité du nettoyage et la longueur effective de l'emboîture.

Finalement, nous recommandons également à ce que les services d'un entrepreneur spécialisé en pieux soient retenus afin de garantir que les travaux seront exécutés en respect avec les règles de l'art applicables.



4.5.7 ESSAIS DE CHARGEMENT

Nous recommandons à ce que la moitié des pieux fasse l'objet d'un essai de chargement. Ces essais devront être réalisés conformément aux exigences de la norme ASTM D1143 / D1143M, pour l'essai « Quick Test ».

4.6 POTENTIEL D'EXPOSITION DU BÉTON AUX SULFATES

Les résultats obtenus pour la teneur en sulfate des sols de remblais actuels ont été comparés aux exigences de la norme CSA A23.1.

Le béton utilisé pour le projet (fondations du bâtiment et pieux du turbogénérateur) devra répondre aux exigences données pour une classe d'exposition S-2. Ces exigences sont résumées dans le tableau 16 :

Tableau 16 Exigences pour les bétons exposés aux sulfates (catégorie S-2)

Paramètre	Béton de catégorie d'exposition S-2
Résistance minimale spécifiée en compression à 56 jours	32 MPa
Rapport maximum eau/liants	0,45
Catégorie de teneur en air	2
Type de liants à employer	50

Rappelons que les essais ont été réalisés sur les sols de remblais actuels et que ce sont de nouveaux remblais qui seront mis en place à proximité des ouvrages. Toutefois, puisque les sulfates sont hydrosolubles, les eaux de la nappe phréatique en contiennent et peuvent donc contaminer les nouveaux remblais.

4.7 RÉUTILISATION DES MATÉRIAUX EN PLACE

D'après les résultats des investigations, les déblais provenant des remblais actuels ne pourront pas être utilisés sous ou en périphérie immédiate des ouvrages à construire puisque leur granulométrie ne correspond pas aux spécifications recommandées pour les matériaux des nouveaux remblais à mettre en place. Ces matériaux pourront être réutilisés comme matériaux d'appoint aux endroits où aucune exigence de compaction ou de drainage n'est requise.

Dans tous les cas, la réutilisation des sols de remblai demeure également sujette aux politiques et règlements environnementaux en vigueur auprès du MDDELCC.



4.8 ASPECT SISMIQUE

Les charges des ouvrages projetés seront transmises au socle rocheux possédant une vitesse d'ondes sismiques de cisaillement de $\pm 1\,900$ m/s. À la lumière de ces résultats et en fonction des paramètres donnés au tableau 4.1.8.4a du *Code national du bâtiment 2005*, le terrain à l'étude se situe dans la catégorie d'emplacement « A ».

4.9 PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES

Tous les matériaux granulaires utilisés devront être de qualité acceptable et être exempts de matières organiques ou de matériaux potentiellement gonflants. Ces matériaux devront faire l'objet d'une acceptation par l'ingénieur préalablement à leur mise en place.

À moins de recommandations spécifiques, les excavations devront être effectuées de telle sorte que tous les sols naturels, en fond de tranchées et surtout ceux devant recevoir directement des éléments structuraux, soient intacts (non remaniés), exempts de matières organiques et de sols gelés et qu'ils soient bien drainés. Les assises rocheuses déstabilisées devront également être excavées.

4.10 SUIVI DE CONSTRUCTION

En fonction des travaux devant être réalisés sur le site, nous recommandons de prévoir un programme de contrôle continu pour l'approbation des fonds d'excavation, le suivi de la mise en place des remblais contrôlés et des pieux.

Nous recommandons également de prévoir un programme de contrôle pour vérifier la qualité et la mise en place du béton de ciment des fondations, des dalles sur sol et des éléments structuraux. Le contrôle du béton de ciment devrait inclure le suivi en cours de coulée de la température, de l'affaissement et du pourcentage d'air entraîné du béton frais ainsi que la mesure de la résistance en compression du béton durci. La mise en place du béton et le mûrissement devraient faire l'objet d'une attention particulière puisque ces facteurs sont déterminants sur la qualité et la pérennité de l'ouvrage, et ce, d'autant plus si les travaux sont effectués en condition hivernale ou en période de chaleur intense.



5 PERSONNEL

Les travaux en chantier ont été réalisés par monsieur Andrew Cavanagh, technicien. Madame Karine Minguy, ingénieure n° OIQ 145947, a rédigé le présent rapport portant le n° F1417238-001, lequel a été vérifié et approuvé par madame Sonya Graveline, ingénieure n° OIQ 116692.

6 LIMITATIONS

Les résultats obtenus lors de cette étude géotechnique ne sont applicables qu'en regard des hypothèses et des données utilisées au cours de l'étude et sur les limites et techniques d'exploration. Si des conditions géotechniques différentes de celles décrites dans ce rapport sont rencontrées en cours de travaux, elles devraient faire l'objet d'une vérification de la part d'un ingénieur géotechnicien lequel pourra en déterminer les impacts sur l'ouvrage à construire et si requis, émettre de nouvelles recommandations.

Les conditions d'eau souterraine décrites dans ce rapport se rapportent uniquement à celles observées aux endroits et aux dates indiquées dans ce rapport. Il est important de noter que le niveau de l'eau souterraine peut être influencé par plusieurs facteurs dont, entre autres, les précipitations, la fonte des neiges et les modifications apportées au milieu physique et qu'ainsi, il peut varier avec les saisons et les années.

Toutes les données factuelles, les interprétations et les recommandations émises dans le présent rapport se rapportent uniquement au projet décrit dans ce rapport et ne s'appliquent à aucun autre projet ou site. Ce rapport a été préparé pour le seul bénéfice de notre client. Nous déclinons toute responsabilité ou obligation associée à l'utilisation de ce rapport par une tierce personne, de même que toute décision qui en découle, lui en est strictement imputable.

Advenant que des changements soient apportés à l'élévation, la localisation, la conception et la nature du projet, alors les conclusions et recommandations de notre rapport ne devront pas être considérées valides à moins que l'impact desdits changements ne soit évalué par **Labo S.M. inc.**, et que les conclusions du rapport soient modifiées ou maintenues par écrit. Il pourrait être nécessaire d'effectuer de nouveaux sondages et d'émettre un rapport complémentaire.

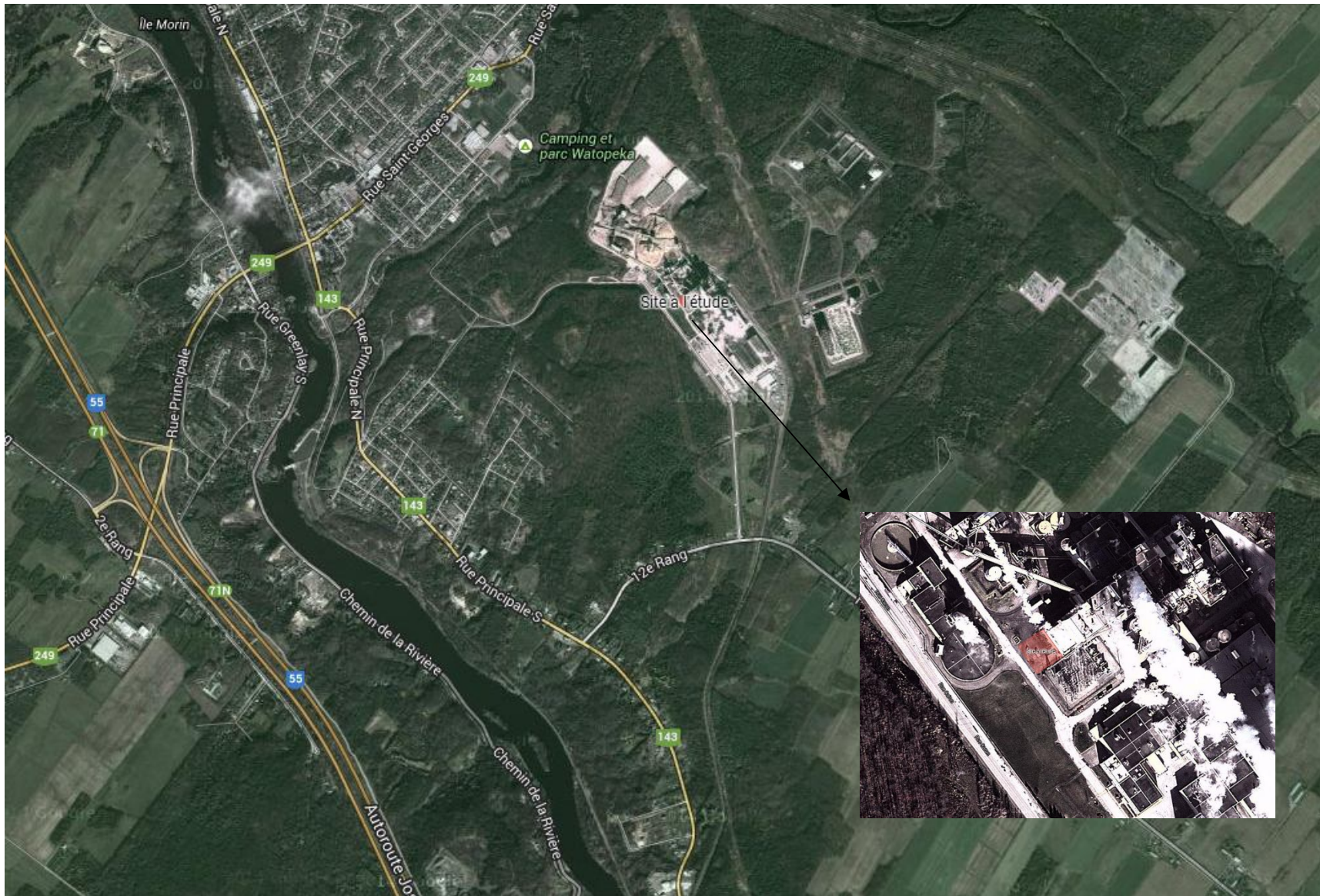


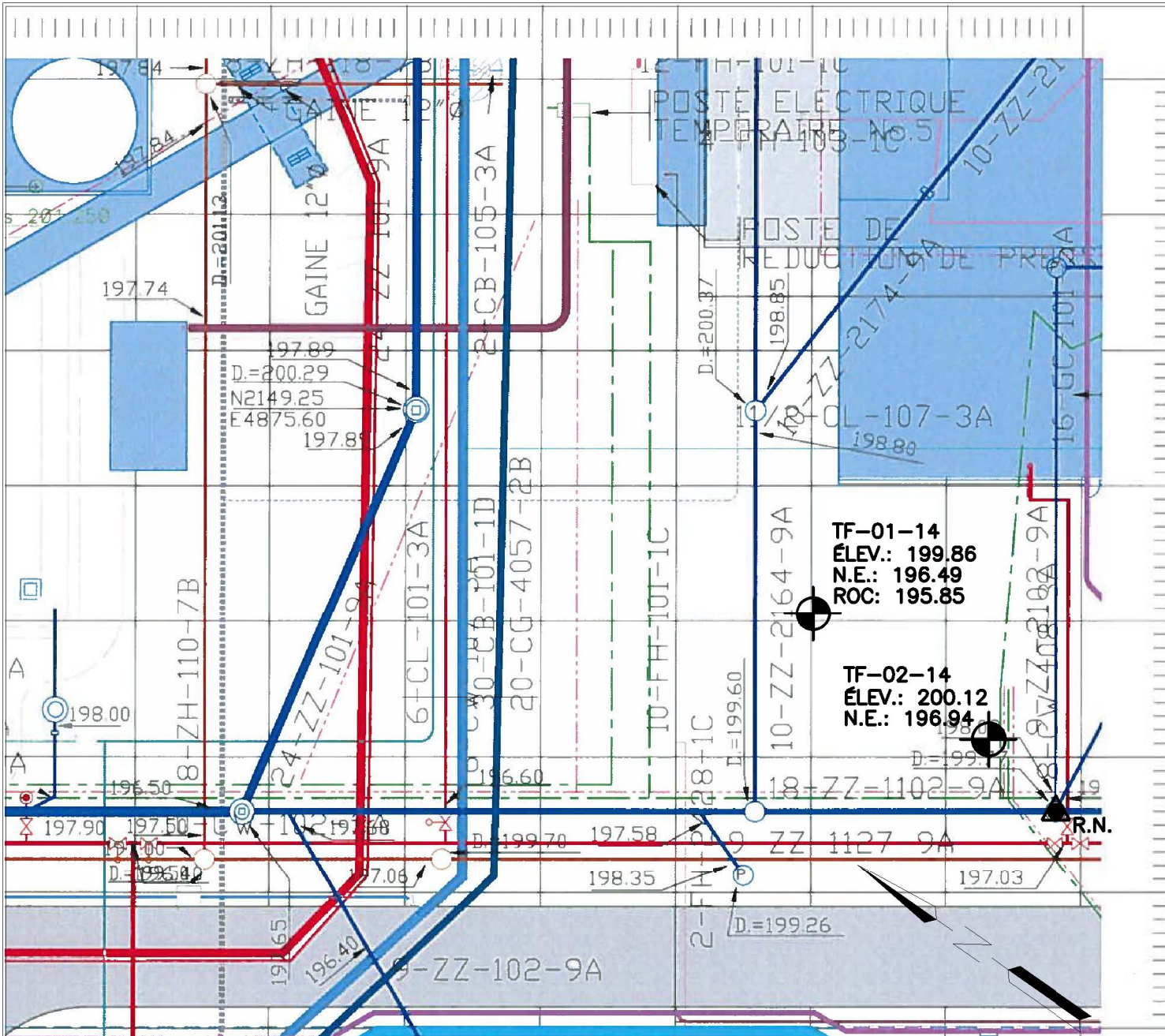
Annexe I

LOCALISATION DU SITE À L'ÉTUDE

LOCALISATION DES FORAGES

Localisation du site à l'étude





LÉGENDE

-  TF-XX-14 forage SMi 2014
-  R.N. repère de nivellement
- ÉLEV. niveau du terrain
- N.E. niveau d'eau (mesuré le 16-05-2014)
- ROC niveau du roc

Notes:

1. Le repère de nivellement utilisé, dont l'élévation géodésique est de 199.77m, correspond au dessus du regard d'égout pluvial situé à proximité de la porte #133. Toutes les élévations sont exprimées en mètres et sont géodésiques.
2. Le relevé géophysique downhole et le sondage électrique ont été réalisés vis-à-vis le forage TF-02-14.
3. Plan de base: dessin n°B-116-48_22-000 fourni par Domtar.

Échelle:



Projet: Étude géotechnique
Ajout d'un turbogénérateur
Usine Domtar, 609 rang 12, Windsor, Québec

Titre: Figure de localisation des forages

Client: Domtar

Dessiné par: Karine Minguy, ing.

Appr. par: Karine Minguy, ing.

Date: 9 juin 2014

Discipline: Géotechnique

Échelle: graphique

Réfer.: ZONE 4800 - 2200 À 4900 - 2100
PERMIS D'EXCAVATION

No. Dossier: F1417238-001

No. Dessin: 17238001K001



Annexe II

RAPPORTS DE FORAGE

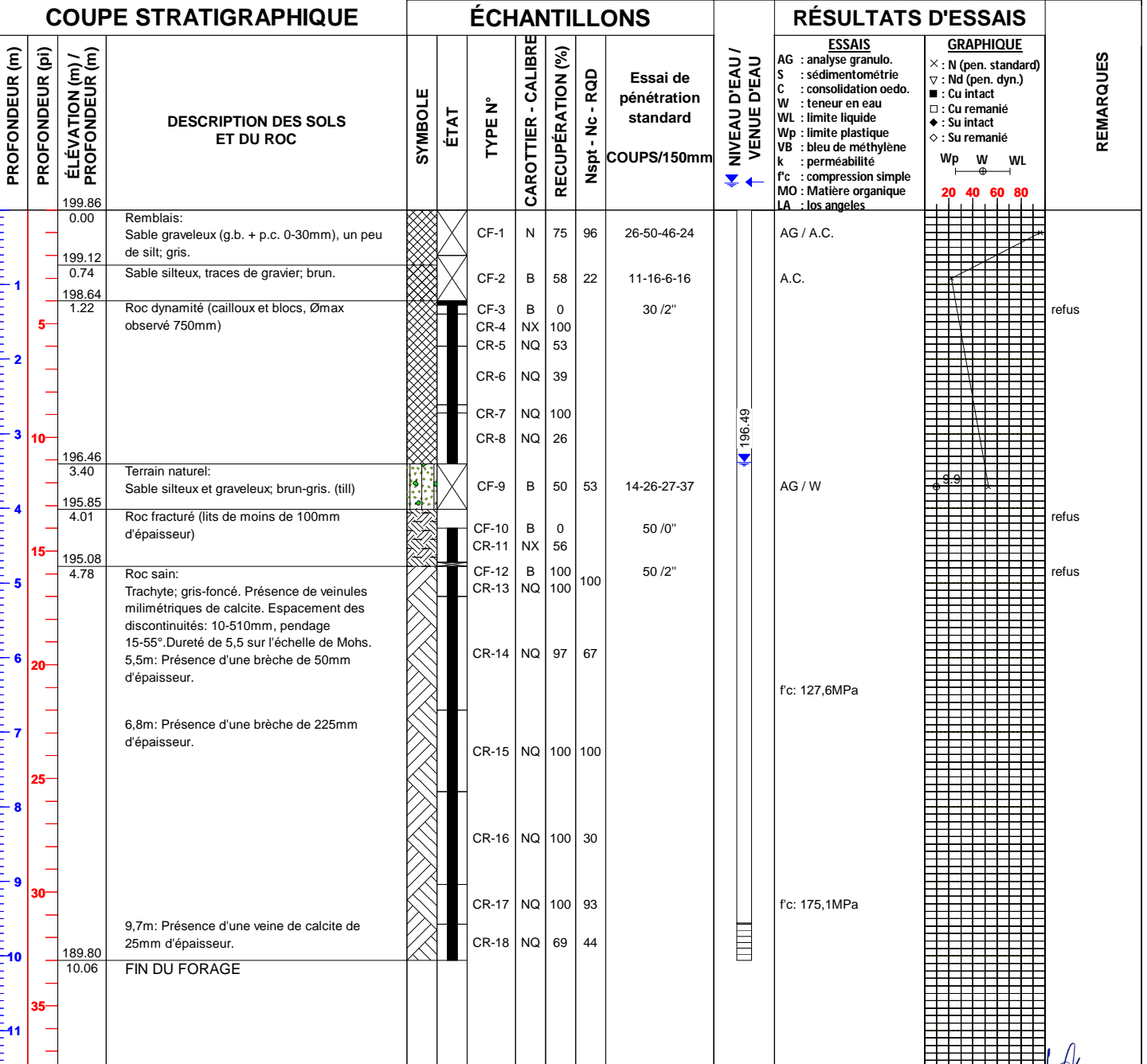
Projet: Étude géotechnique - Ajout d'un turbogénérateur
 Client: Domtar
 Site: 609, rang 12, Windsor (Québec)
 N./réf.: F1417238001
 Figure: F1417238001K001

Localisation: réf. figure
 X: 2119.0
 Y: 4859.0
 Type de sondage: FORAGE
 Équipement: Longyear BK-51
 Tubage: Tarières, NW Carottier: N, B, NX, NQ

N° sondage: TF-01-14
 Page: 1 de 1
 Date début: 2014-05-15
 Inspecteur: Andrew Cavanagh, tech.
 Profondeur: 10.06m
 Élévation géodésique: 199.86m

TYPE D'ÉCHANTILLON	TERMINOLOGIE QUALITATIVE	TERMINOLOGIE QUANTITATIVE	SYMBOLES	EAUX SOUTERRAINES						
CF Cuillère fendue	Argile < 0,002 mm	Traces < 10 %	N Indice de pénétration standard (ASTM D 1586)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Date</th> <th>Profondeur</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lecture 1 2014-05-17</td> <td>3.37m</td> </tr> <tr> <td>Lecture 2</td> <td>m</td> </tr> </tbody> </table>	Date	Profondeur	Lecture 1 2014-05-17	3.37m	Lecture 2	m
Date	Profondeur									
Lecture 1 2014-05-17	3.37m									
Lecture 2	m									
CFC Tube d'échantillonnage continu	Silt 0,002 - 0,08 mm	Un peu 10 - 20 %	Nc Indice de pénétration au cône (BNQ 2501-145)							
CR Carottier à diamants	Sable 0,08 - 5 mm	Adjectif (...eux) 20 - 35 %	RQD Indice de la qualité du roc (%)							
TM Tube à parois minces	Gravier 5 - 80 mm	et (ex: et gravier) > 35 %								
TA Tarière	Cailloux 80 - 200 mm	mot principal Fraction dominante								
TS Tube shelly	Blocs > 200 mm									
EM Échantillon manuel										

ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS	INDICE DE QUALITÉ DU ROC	ESPACEMENT DES DISCONTINUITÉS
Remanié Intact (tube à parois minces) Perdu Carotté (forage au diamant)	COMPACTITÉ Très lâche Lâche Compacte Dense Très dense	INDICE "N" 0 - 4 4 - 10 10 - 30 30 - 50 > 50	QUALIFICATIF Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellente



Remarques générales:

Vérfié par:
 Karim Minguy, ing.
 Date: 2014-06-20

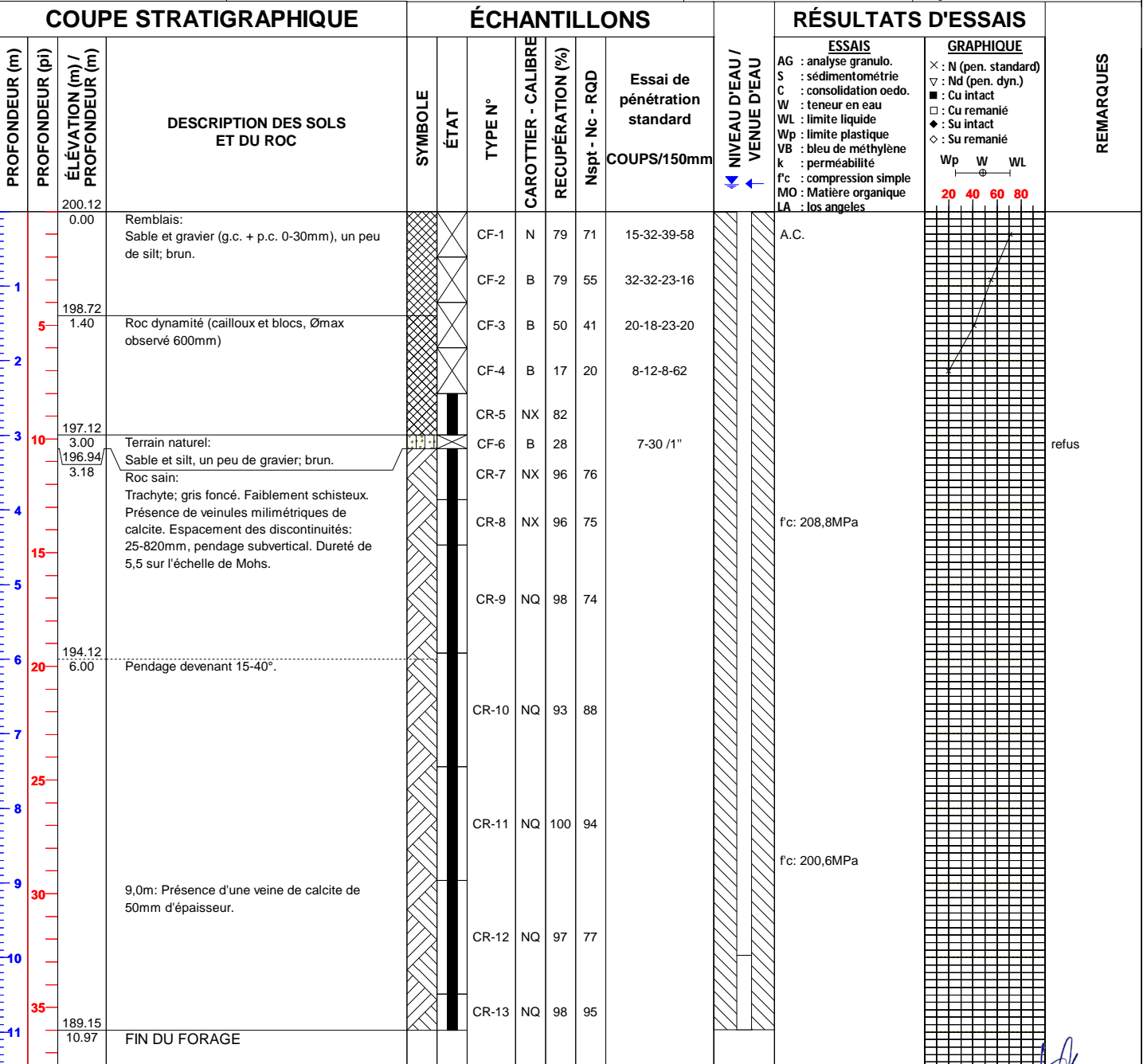
Projet: Étude géotechnique - Ajout d'un turbogénérateur
 Client: Domtar
 Site: 609, rang 12, Windsor (Québec)
 N./réf.: F1417238001
 Figure: F1417238001K001

Localisation: réf. figure
 X: 2107.0
 Y: 4850.0
 Type de sondage: FORAGE
 Équipement: Diedrich D-50
 Tubage: Tarières, NW Carottier: N, B, NX, NQ

N° sondage: TF-02-14
 Page: 1 de 1
 Date début: 2014-05-17
 Inspecteur: Andrew Cavanagh, tech.
 Profondeur: 10.97m
 Élévation géodésique: 200.12m

TYPE D'ÉCHANTILLON	TERMINOLOGIE QUALITATIVE	TERMINOLOGIE QUANTITATIVE	SYMBOLES	EAUX SOUTERRAINES						
CF Cuillère fendue	Argile < 0,002 mm	Traces < 10 %	N Indice de pénétration standard (ASTM D 1586)	<table border="1"> <tr> <th>Date</th> <th>Profondeur</th> </tr> <tr> <td>Lecture 1</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>Lecture 2</td> <td>m</td> </tr> </table>	Date	Profondeur	Lecture 1	m	Lecture 2	m
Date	Profondeur									
Lecture 1	m									
Lecture 2	m									
CFC Tube d'échantillonnage continu	Silt 0,002 - 0,08 mm	Un peu 10 - 20 %	Nc Indice de pénétration au cône (BNQ 2501-145)							
CR Carottier à diamants	Sable 0,08 - 5 mm	Adjectif (...eux) 20 - 35 %	RQD Indice de la qualité du roc (%)							
TM Tube à parois minces	Gravier 5 - 80 mm	et (ex: et gravier) > 35 %								
TA Tarière	Cailloux 80 - 200 mm	mot principal Fraction dominante								
TS Tube shelby	Blocs > 200 mm									
EM Échantillon manuel										

ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS	INDICE DE QUALITÉ DU ROC	ESPACEMENT DES DISCONTINUITÉS
Remanié Intact (tube à parois minces) Perdu Carotté (forage au diamant)	COMPACITÉ Très lâche 0 - 4 Lâche 4 - 10 Compacte 10 - 30 Dense 30 - 50 Très dense > 50	CONSISTANCE Très molle 0 - 4 Molle 4 - 10 Ferme 10 - 30 Raide 30 - 50 Très raide > 50 Dure > 200	ROD < 25 % 25 - 50 % 50 - 75 % 75 - 90 % 90 - 100 % Excellente



Remarques générales: Trou de forage utilisé pour la réalisation du levé géophysique de type downhole

Vérfié par:
 Karim Minguy, ing.
 Date: 2014-06-20



Annexe III

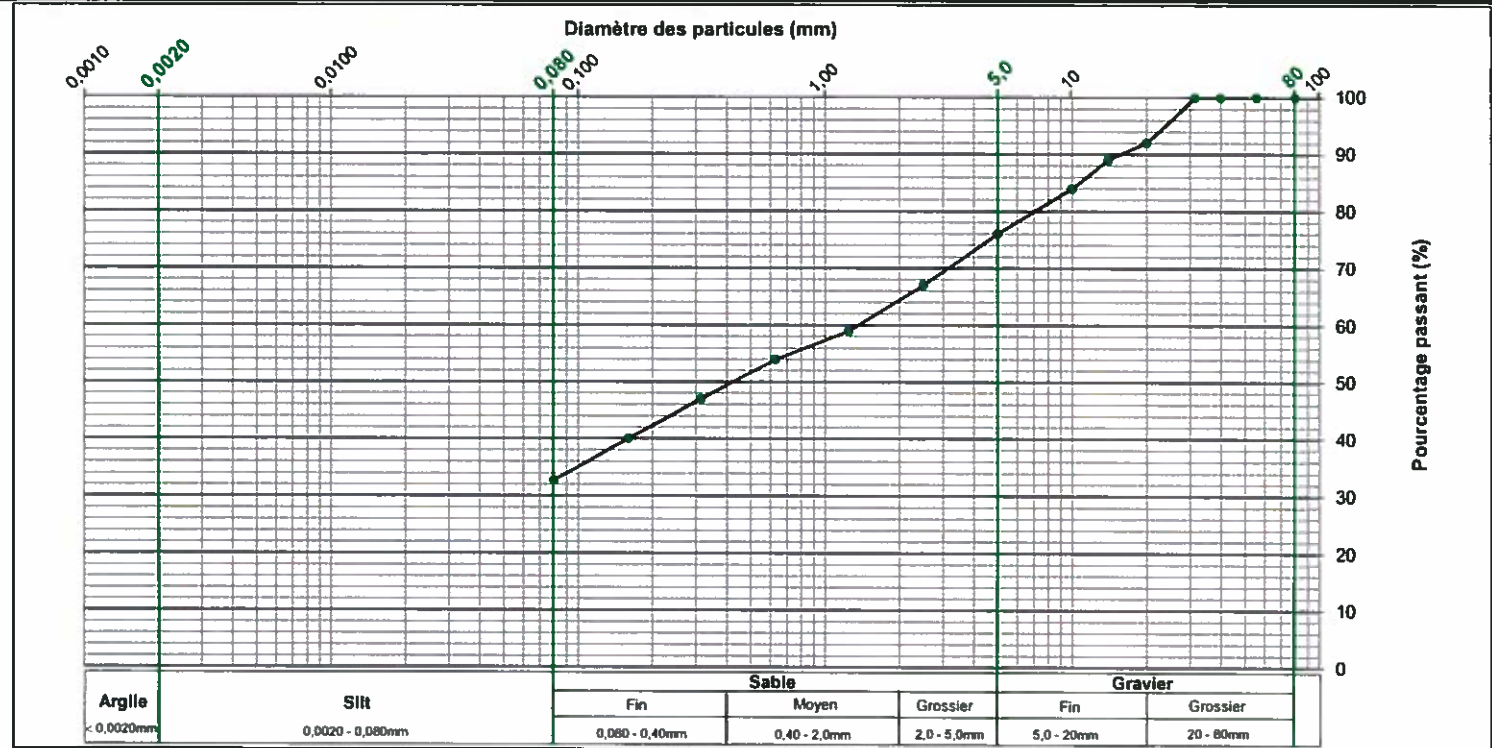
RAPPORTS D'ANALYSES EN LABORATOIRE

**SMⁱ**

LABO S.M. INC.

Rapport no. : 1401297-1
Laboratoire no. : 14-26973Analyse granulométrique par tamisage LC 21-040
Analyse granulométrique par sédimentation BNQ 2501-025

Diamètre (mm)	Passant (%)
112	100
80	100
56	100
40	100
31,5	100
20	92
14	89
10	84
5	76
2,5	67
1,25	59
0,630	54
0,315	47
0,160	40
0,080	32,8



% Gravier:	24
% Sable:	43,2
% Silt*:	32,8
% Argile:	
Cu:	
Cc:	
D10:	
D15:	
D30:	
D50:	0,4240
D60:	1,3631
D85:	10,6961

Propriétés physiques et mécaniques		
Analyses	Norme	Résultats
Détermination de la teneur en eau	BNQ 2501-170	9,9%

N° Dossier: F1417238001	Sondage: TF-01-14	Description: Sable silteux et graveleux
Client: Domtar	Échantillon: CF-9	Remarques:
Projet: Étude géotechnique - ajout d'un turbogénérateur	Profondeur: 3,4 à 4,0m	
Site: Usine de Windsor	Prélevé par: Andrew Cavanagh,tech	*Inclus le pourcentage d'argile lorsque ce dernier n'est pas précisé
	Prélevé le: 2014-05-16	

Vérifié par : Mélanie Tessier
Mélanie Tessier, chef de laboratoireDate: 2014-06-05 Approuvé par : Marine Minguy
Marine Minguy, ing.

Date: 2014-06-05

FLG-210 (09-2012) rev.0

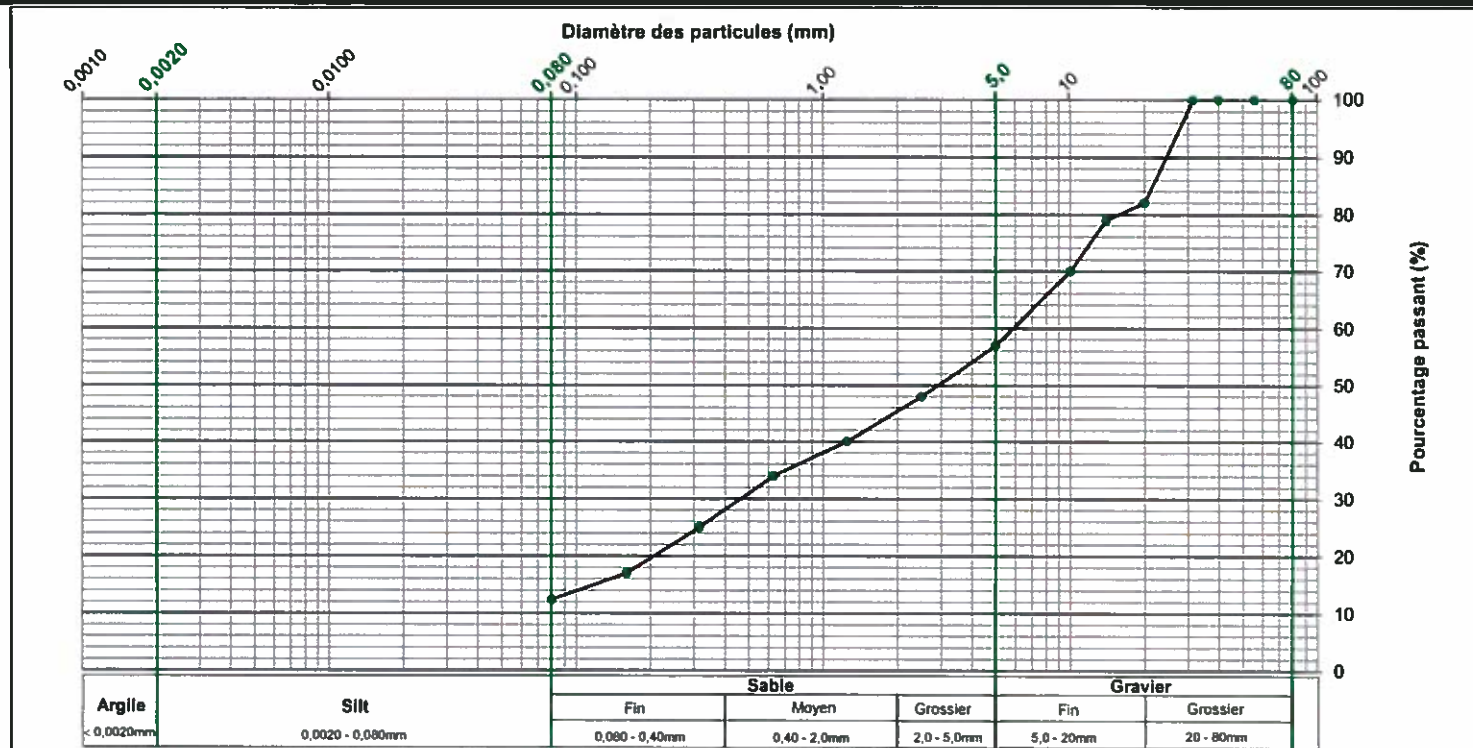
Notes : Le résultat s'applique exclusivement à l'échantillon analysé. Ce rapport ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite de Labo S.M. inc.

**SMⁱ**

LABO S.M. INC.

Rapport no. : 1401297-2
Laboratoire no. : 14-26974Analyse granulométrique par tamisage LC 21-040
Analyse granulométrique par sédimentation BNQ 2501-025

Diamètre (mm)	Passant (%)
112	100
80	100
56	100
40	100
31,5	100
20	82
14	79
10	70
5	57
2,5	48
1,25	40
0,630	34
0,315	25
0,160	17
0,080	12,4



% Gravier:	43
% Sable:	44,6
% Silt*:	12,4
% Argile:	
Cu:	
Cc:	
D10:	
D15:	0,1180
D30:	0,4630
D50:	2,9163
D60:	5,8673
D85:	21,5730

Propriétés physiques et mécaniques		
Analyses	Norme	Résultats

N° Dossier: F1417238001	Sondage: TF-02-14	Description: Sable et gravier, un peu de silt
Client: Domtar	Échantillon: CF-1	Remarques:
Projet: Étude géotechnique - ajout d'un turbogénérateur	Profondeur: 0 à 0,6m	
Site: Usine de Windsor	Prélevé par: Andrew Cavanagh,tech	
	Prélevé le: 2014-05-16	*Inclus le pourcentage d'argile lorsque ce dernier n'est pas précisé

Vérifié par : Mélanie Tessier
Mélanie Tessier, chef de laboratoireDate: 2014-06-05 Approuvé par : Karine Minguy
Karine Minguy, ing.

Date: 2014-06-05



Labo S.M. inc.
Une division du Groupe S.M. inc

- 740, rue Galt Ouest, 2e étage, Sherbrooke (Qc) J1H 1Z3 Tél: (819) 566-8855 Fax: (819) 566-0224
- 1471, boul. Lionel-Boulet, Varennes (Qc) J3X 1P7 Tél: (450) 652-6151 Fax: (450) 652-6451
- 75, rue Queen, bureau 5200, Montréal (Qc) H3C 2N6 Tél: (514) 982-6001 Fax: (514) 982-6106
- 4540, rue Laval, Lac-Mégantic (Qc) G6B 1C5 Tél: (819) 583-4255 Fax: (819) 583-1997
- 2111, boul. Fernand-Lafontaine, Longueuil (Qc) J4G 2J4 Tél: (450) 651-0981 Fax: (450) 651-9542

Rapport n° 1401152

RAPPORT D'ESSAIS
MESURE DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION SUR CAROTTES DE ROC
ASTM D 7012-07

Numéro de dossier : F1417238001	Conditionnement : sec
Numéro de laboratoire : 14-26714 et 14-26715	Matériau de coiffe : meule
Projet : Étude géotechnique - ajout d'un turbogénérateur	Température de confinement : 22
Client : Domtar	Prélevé par : A. Cavanagh le 14-05-16
	Réalisé par : D. Laroche le 14-05-30
	Site :
	Contrat :

Date rupturée	Forage N°	# échant.	Profondeur d'essais (m)	Diamètre				Longueur		Rapport L/D	Charge (kN)	Résistance en compression (MPa)	Temps de rupture (sec)
				1	2	3	moyen	initiale	meulée				
				(mm)				(mm)					
14-05-30	TF-01-14	CR-14	6,56-6,71	47,25	47,24	47,19	47,23	176,92	100,85	2,14	223,5	127,6	420
14-05-30	TF-02-14	CR-8	4,02-4,22	54,59	54,53	54,46	54,53	225,71	118,26	2,17	477,3	204,4	600

L/D: Rapport Longueur/Diamètre

Remarques:

Préparé par: Sylvie Daigle, tech. Chef Labo Date: 14-05-30
 Vérifié par: Karine Minguy, ing. Date: 14-05-30



Labo S.M. inc.
Une division du Groupe S.M. inc

- 740, rue Galt Ouest, 2e étage, Sherbrooke (Qc) J1H 1Z3 Tél: (819) 566-8855 Fax: (819) 566-0224
- 1471, boul. Lionel-Boulet, Varennes (Qc) J3X 1P7 Tél: (450) 652-6151 Fax: (450) 652-6451
- 75, rue Queen, bureau 5200, Montréal (Qc) H3C 2N6 Tél: (514) 982-8001 Fax: (514) 982-6106
- 4540, rue Laval, Lac-Mégantic (Qc) G6B 1C5 Tél: (819) 583-4255 Fax: (819) 583-1997
- 2111, boul. Fernand-Lafontaine, Longueuil (Qc) J4G 2J4 Tél: (450) 651-0981 Fax: (450) 651-9542

Rapport n° 1401308

RAPPORT D'ESSAIS
MESURE DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION SUR CAROTTES DE ROC
ASTM D 7012-07

Numéro de dossier : F1417238001 Numéro de laboratoire : 14-27005 et 14-27007 Projet : Étude géotechnique - ajout d'un turbogénérateur Client : Domtar	Conditionnement : sec Matériau de coiffe : meule Température de confinement : 22 Prélevé par : A. Cavanagh le 14-05-16 Réalisé par : A. Hardy le 14-06-05 Site : Contrat :
--	--

Date rupturée	Forage N°	# échant.	Profondeur d'essais (m)	Diamètre				Longueur		Rapport L/D	Charge (kN)	Résistance en compression (MPa)	Temps de rupture (sec)
				1	2	3	moyen	initiale	meulée				
				(mm)				(mm)					
14-06-05	TF-01-14	CR-17	9,07-9,60	47,10	47,12	47,08	47,10	161,62	105,91	2,25	305,1	175,1	600
14-06-05	TF-02-14	CR-11	7,47-7,62	47,47	47,44	47,43	47,45	167,15	103,37	2,18	354,7	200,6	600

L/D: Rapport Longueur/Diamètre

Remarques:

Préparé par: Sylvie Daigle, tech. Chef Labo Date: 14-06-06 Vérifié par: Karine Minguy, ing. Date: 14-06-06

Notes : Le résultat s'applique exclusivement à l'échantillon analysé.

Ce rapport ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite de Labo S.M. inc.



Annexe IV

RÉSULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES ET CERTIFICATS

Tableau
Résultats des analyses chimiques des échantillons de sols

Paramètres	Critères du MDDEFP ¹				Concentration			
	Critère A ²	Critère B ³ / Annexe I du RPRT ⁴	Critère C ³ / Annexe II du RPRT ⁴	Annexe I du RESC ⁵	TF-01-14/CF-1A	TF-01-14/CF-2B	TF-02-14/CF-1	DUPA
					0,0 à 0,2 m	0,7 à 1,2 m	0,0 à 0,6 m	0,0 à 0,6 m
					2265754	2265755	2265756	2265757
				2014-06-06	2014-06-06	2014-06-06	2014-06-06	
HAP (mg/kg)								
Acénaphène	0,1	10	100	100	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Anthracène	0,1	10	100	100	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Benzo (b,j) fluoranthène	0,1	1	10	136	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	136	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Chrysène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Diméthyl-1,3 naphthalène	0,1	1	10	-	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Fluorène	0,1	10	100	100	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Méthyl-1 naphthalène	0,1	1	10	56	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Méthyl-2 naphthalène	0,1	1	10	56	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Naphthalène	0,1	5	50	56	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Pyrène	0,1	10	100	100	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	0,1	1	10	-	<0,10	<0,10	<0,10	n.a.
Hydrocarbures pétroliers C₁₀ à C₅₀ (mg/kg)	300	700	3 500	10 000	<100	<100	<100	<100
Métaux (mg/kg)								
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0,8	<0,8	<0,8	n.a.
Arsenic (As)	6	30	50	250	4,7	4,2	4,8	n.a.
Baryum (Ba)	200	500	2 000	10 000	50	81	22	n.a.
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<1,0	<1,0	<1,0	n.a.
Chrome (Cr)	85	250	800	4 000	19	26	13	n.a.
Cobalt (Co)	15	50	300	1 500	<10	10	<10	n.a.
Cuivre (Cu)	40	100	500	2 500	16	18	14	n.a.
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5,0	<5,0	<5,0	n.a.
Manganèse (Mn)	770	1 000	2 200	11 000	541	329	381	n.a.
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1,5	<1,5	<1,5	n.a.
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	39	37	29	n.a.
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	13	<10	<10	n.a.
Zinc (Zn)	110	500	1 500	7 500	83	46	34	n.a.

Légende:

X,X	Plage A-B (< Annexe I du RPRT)
X,X	Plage B-C (> Annexe I du RPRT)
X,X	> Critère C (> Annexe II du RPRT)
X,X	> Annexe I du RESC

- : Indéterminé
n.a. : Non analysé

Notes:

- 1 : Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec
- 2 : Teneurs de fond des Basses-Terres du Saint-Laurent
- 3 : Critère générique de la *Politique de la protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés* du MDDEP⁷, novembre 2011
- 4 : Critère générique du *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains* du MENV⁷, février 2003
- 5 : Critère générique du *Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés* du MENV, juillet 2001
- 6 : Équivalence toxique totale (OTAN, 1989)
- 7 : Anciennes appellations du MDDEFP



SM

LABORATOIRES
D'ANALYSES
S.M. INC.

2350, Chemin du Lac
Longueuil, Québec J4N 1G8
Tél. (514) 332-6001 Téléc. (514) 332-5066

740, Galt Ouest, 2e étage
Sherbrooke, Québec J1H 1Z3
Tél. (819) 566-8855 Téléc. (819) 566-0224

3705, boul. Industriel
Sherbrooke, Québec J1L 1X8
Tél. (819) 566-8855 Téléc. (819) 566-0224

Certificat d'analyse

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Client: **LABO S.M.**
Mme Karine Minguy
740 Galt Ouest
2 ième étage
Sherbrooke, Québec
J1H 1Z3

No client: 1838
Tél.: 819-566-8855 ext7240
Téléc.: 819-566-0224
No projet: 13497
Bon de commande: F1417238-001
No dossier MDDEFP:

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP
Sous-projet: Analyses de sols

Nature de l'échantillon: Sol

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
---------	-------------	----------	-------	-------	------------



Certificat d'analyse (suite)

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP

Nature de l'échantillon: Sol

Sous-projet: Analyses de sols

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
2265754	Étude géot. nouveau turbogénérateur à l'usine Domtar de Windsor - TF-01-14/CF-1A				
	Prélevé le: 2014-05-16 Par: Andrew Cavanagh,tech Reçu le: 2014-06-04				
	Sulfate (PNA)	21.0	mg/Kg		2014-06-06
	Pourcentage d'humidité	4.3	%		2014-06-06
	Hydrocarbures pétroliers C10-C50	<100	mg/Kg	A=300 B=700 C=3500	2014-06-06
	Métaux	-	-		2014-06-05
	Argent (Ag)	<0.8	mg/Kg	A=2 B=20 C=40	2014-06-05
	Arsenic (As)	4.7	mg/Kg	A=6 B=30 C=50	2014-06-05
	Baryum (Ba)	50	mg/Kg	A=200 B=500 C=2000	2014-06-05
	Cadmium (Cd)	<1.0	mg/Kg	A=1.5 B=5 C=20	2014-06-05
	Chrome (Cr)	19	mg/Kg	A=85 B=250 C=800	2014-06-05
	Cobalt (Co)	<10	mg/Kg	A=15 B=50 C=300	2014-06-05
	Cuivre (Cu)	16	mg/Kg	A=40 B=100 C=500	2014-06-05
	Étain (Sn)	<5.0	mg/Kg	A=5 B=50 C=300	2014-06-05
	Manganèse (Mn)	541	mg/Kg	A=770 B=1000 C=2200	2014-06-05
	Molybdène (Mo)	<1.5	mg/Kg	A=2 B=10 C=40	2014-06-05
	Nickel (Ni)	39	mg/Kg	A=50 B=100 C=500	2014-06-05
	Plomb (Pb)	13	mg/Kg	A=50 B=500 C=1000	2014-06-05
	Zinc (Zn)	83	mg/Kg	A=110 B=500 C=1500	2014-06-05
	HAP	-	-		2014-06-06
	Acénaphène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Acénaphthylène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Benzo (a) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (a) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	benzo (b) fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	benzo(j)fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo [k] fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (bjk) fluoranthène (Somme)	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (c) phénanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (g,h,i) pérylène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Chrysène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,h) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,h) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,i) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,l) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Diméthyl-1,3 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Fluorène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-1 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-2 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-3 cholanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=5 C=50	2014-06-06
	Phénanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=5 C=50	2014-06-06
	Pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06

- L'interprétation des critères est spécifiée à titre indicatif seulement.

- Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite des Laboratoires d'analyses S.M. inc.

- Les résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

- (PNA) indique un Paramètre Non Accrédité.

**SM**LABORATOIRES
D'ANALYSES
S.M. INC.

Certificat d'analyse (suite)

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP

Nature de l'échantillon: Sol

Sous-projet: Analyses de sols

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
	Triméthyl-2,3,5 naphtalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	<u>% de récupération des étalons analogues</u>	-	-		2014-06-06
	d10-acénaphène	88	%		2014-06-06
	d10-phénanthrène	84	%		2014-06-06
	d12-Benzo[ghi]pérylène	interference	%		2014-06-06

- L'interprétation des critères est spécifiée à titre indicatif seulement.

- Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite des Laboratoires d'analyses S.M. inc.

- Les résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

- (PNA) indique un Paramètre Non Accrédité.



Certificat d'analyse (suite)

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP

Nature de l'échantillon: Sol

Sous-projet: Analyses de sols

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
2265755	Étude géot. nouveau turbogénérateur à l'usine Domtar de Windsor - TF-01-14/CF-2B				
	Prélevé le: 2014-05-16 Par: Andrew Cavanagh,tech Reçu le: 2014-06-04				
	Sulfate (PNA)	15.0	mg/Kg		2014-06-06
	Pourcentage d'humidité	13.4	%		2014-06-06
	Hydrocarbures pétroliers C10-C50	<100	mg/Kg	A=300 B=700 C=3500	2014-06-06
	Métaux	-	-		2014-06-05
	Argent (Ag)	<0.8	mg/Kg	A=2 B=20 C=40	2014-06-05
	Arsenic (As)	4.2	mg/Kg	A=6 B=30 C=50	2014-06-05
	Baryum (Ba)	81	mg/Kg	A=200 B=500 C=2000	2014-06-05
	Cadmium (Cd)	<1.0	mg/Kg	A=1.5 B=5 C=20	2014-06-05
	Chrome (Cr)	26	mg/Kg	A=85 B=250 C=800	2014-06-05
	Cobalt (Co)	10	mg/Kg	A=15 B=50 C=300	2014-06-05
	Cuivre (Cu)	18	mg/Kg	A=40 B=100 C=500	2014-06-05
	Étain (Sn)	<5.0	mg/Kg	A=5 B=50 C=300	2014-06-05
	Manganèse (Mn)	329	mg/Kg	A=770 B=1000 C=2200	2014-06-05
	Molybdène (Mo)	<1.5	mg/Kg	A=2 B=10 C=40	2014-06-05
	Nickel (Ni)	37	mg/Kg	A=50 B=100 C=500	2014-06-05
	Plomb (Pb)	<10	mg/Kg	A=50 B=500 C=1000	2014-06-05
	Zinc (Zn)	46	mg/Kg	A=110 B=500 C=1500	2014-06-05
	HAP	-	-		2014-06-06
	Acénaphène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Acénaphthylène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Benzo (a) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (a) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	benzo (b) fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	benzo(j)fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo [k] fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (bjk) fluoranthène (Somme)	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (c) phénanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (g,h,i) pérylène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Chrysène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,h) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,h) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,i) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,l) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Diméthyl-1,3 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Fluorène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-1 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-2 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-3 cholanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=5 C=50	2014-06-06
	Phénanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=5 C=50	2014-06-06
	Pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06

- L'interprétation des critères est spécifiée à titre indicatif seulement.

- Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite des Laboratoires d'analyses S.M. inc.

- Les résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

- (PNA) indique un Paramètre Non Accrédité.

**SM**LABORATOIRES
D'ANALYSES
S.M. INC.

Certificat d'analyse (suite)

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP

Nature de l'échantillon: Sol

Sous-projet: Analyses de sols

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
	Triméthyl-2,3,5 naphtalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	<u>% de récupération des étalons analogues</u>	-	-		2014-06-06
	d10-acénaphène	85	%		2014-06-06
	d10-phénanthrène	87	%		2014-06-06
	d12-Benzo[ghi]pérylène	53	%		2014-06-06

- L'interprétation des critères est spécifiée à titre indicatif seulement.

- Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite des Laboratoires d'analyses S.M. inc.

- Les résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

- (PNA) indique un Paramètre Non Accrédité.



Certificat d'analyse (suite)

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP

Nature de l'échantillon: Sol

Sous-projet: Analyses de sols

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
2265756	Étude géot. nouveau turbogénérateur à l'usine Domtar de Windsor - TF-02-14/CF-1				
	Prélevé le: 2014-05-16 Par: Andrew Cavanagh,tech Reçu le: 2014-06-04				
	Sulfate (PNA)	32.0	mg/Kg		2014-06-06
	Pourcentage d'humidité	3.3	%		2014-06-06
	Hydrocarbures pétroliers C10-C50	<100	mg/Kg	A=300 B=700 C=3500	2014-06-06
	Métaux	-	-		2014-06-05
	Argent (Ag)	<0.8	mg/Kg	A=2 B=20 C=40	2014-06-05
	Arsenic (As)	4.8	mg/Kg	A=6 B=30 C=50	2014-06-05
	Baryum (Ba)	22	mg/Kg	A=200 B=500 C=2000	2014-06-05
	Cadmium (Cd)	<1.0	mg/Kg	A=1.5 B=5 C=20	2014-06-05
	Chrome (Cr)	13	mg/Kg	A=85 B=250 C=800	2014-06-05
	Cobalt (Co)	<10	mg/Kg	A=15 B=50 C=300	2014-06-05
	Cuivre (Cu)	14	mg/Kg	A=40 B=100 C=500	2014-06-05
	Étain (Sn)	<5.0	mg/Kg	A=5 B=50 C=300	2014-06-05
	Manganèse (Mn)	381	mg/Kg	A=770 B=1000 C=2200	2014-06-05
	Molybdène (Mo)	<1.5	mg/Kg	A=2 B=10 C=40	2014-06-05
	Nickel (Ni)	29	mg/Kg	A=50 B=100 C=500	2014-06-05
	Plomb (Pb)	<10	mg/Kg	A=50 B=500 C=1000	2014-06-05
	Zinc (Zn)	34	mg/Kg	A=110 B=500 C=1500	2014-06-05
	HAP	-	-		2014-06-06
	Acénaphène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Acénaphthylène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Benzo (a) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (a) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	benzo (b) fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	benzo(j)fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo [k] fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (bjk) fluoranthène (Somme)	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (c) phénanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Benzo (g,h,i) pérylène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Chrysène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,h) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,h) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,i) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Dibenzo (a,l) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Diméthyl-1,3 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Fluoranthène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Fluorène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06
	Indéno (1,2,3-cd) pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-1 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-2 naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Méthyl-3 cholanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	Naphthalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=5 C=50	2014-06-06
	Phénanthrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=5 C=50	2014-06-06
	Pyrène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=10 C=100	2014-06-06

- L'interprétation des critères est spécifiée à titre indicatif seulement.

- Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite des Laboratoires d'analyses S.M. inc.

- Les résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

- (PNA) indique un Paramètre Non Accrédité.

**SM**LABORATOIRES
D'ANALYSES
S.M. INC.**Certificat d'analyse (suite)**

No M881095, version 1

Émis le: 2014-06-10

Projet: Analyse de sols ou eaux MDDEP

Nature de l'échantillon: Sol

Sous-projet: Analyses de sols

No éch.	Description	Résultat	Unité	Norme	Analysé le
	Triméthyl-2,3,5 naphtalène	<0.10	mg/Kg	A=0.1 B=1 C=10	2014-06-06
	<u>% de récupération des étalons analogues</u>	-	-		2014-06-06
	d10-acénaphène	94	%		2014-06-06
	d10-phénanthrène	97	%		2014-06-06
	d12-Benzo[ghi]pérylène	61	%		2014-06-06


2265757 / Étude géot. nouveau turbogénérateur à l'usine Dmtar de Windsor - DUPA**Prélevé le: 2014-05-16 Par: Andrew Cavanagh,tech Reçu le: 2014-06-04**


Sulfate (PNA)	34.0	mg/Kg		2014-06-06
Pourcentage d'humidité	3.5	%		2014-06-06
Hydrocarbures pétroliers C10-C50	<100	mg/Kg	A=300 B=700 C=3500	2014-06-06

Méthode d'analyse	Description	Référence externe	Procédure interne
Balayage de métaux par ICPMS	Digestion et ICPMS	MA.200-Mét 1.1	ILCE-069
Anions	Chromatographie ionique	DIONEX	ILCE-060
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	Extraction à l'hexane et GC-FID	MA.410-Hyd.1.0	ILCE-036
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	GCMS	MA.400 - HAP 1.1	ILCE-061
Humidité / siccité	Gravimétrie	MA.100- S.T. 1.1	ILCE-030


 France Luneau, Chimiste, chargée de projet




 Nader Daoud, Chimiste, superviseur



- L'interprétation des critères est spécifiée à titre indicatif seulement.

- Ce certificat ne doit pas être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite des Laboratoires d'analyses S.M. inc.

- Les résultats ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

- (PNA) indique un Paramètre Non Accrédité.

**SM**LABORATOIRES
D'ANALYSES
S.M. INC.2350, Chemin du Lac
Longueuil, Québec J4N 1G8
Tél. (514) 332-6001 Téléc. (514) 332-5066740, Galt Ouest, 2e étage
Sherbrooke, Québec J1H 1Z3
Tél. (819) 566-8855 Téléc. (819) 566-02243705, boul. Industriel
Sherbrooke, Québec J1L 1X8
Tél. (819) 566-8855 Téléc. (819) 566-0224**Annexe au certificat d'analyses**

M881095 version 1

Description	Unités	Limite de détection	Blanc	Matériaux de référence		Récupération		Duplicata	
				% obtenu	limites (%)	% obtenu	limites (%)	% écart	limites (%)

Méthode d'analyse: Digestion et ICPMS / MA.200-Mét 1.1 / ILCE-069						Date d'analyse: 2014-06-05			
						No séquence: CS424652			

Description	Unités	Blanc		% obtenu	limites (%)	-		Duplicata (2264104)	
		Limite de détection	Blanc			% obtenu	limites (%)	% écart	limites (%)
Argent	mg/Kg	0.8	<0.80	98.0	80 - 120	-	-	-	-
Arsenic	mg/Kg	1.5	<1.50	104	80 - 120	-	-	13.6	- 30
Barium	mg/Kg	10	<10.0	100	80 - 120	-	-	-	-
Cadmium	mg/Kg	1	<1.00	101	80 - 120	-	-	N/A	- 30
Cobalt	mg/Kg	10	<10.0	107	80 - 120	-	-	N/A	- 30
Chrome	mg/Kg	10	<10.0	108	80 - 120	-	-	9.52	- 30
Cuivre	mg/Kg	10	<10.0	103	80 - 120	-	-	N/A	- 30
Manganèse	mg/Kg	10	<10.0	104	80 - 120	-	-	1.26	- 30
Molybdène	mg/Kg	1.5	<1.50	101	80 - 120	-	-	-	-
Nickel	mg/Kg	10	<10.0	110	80 - 120	-	-	5.41	- 30
Plomb	mg/Kg	10	<10.0	109	80 - 120	-	-	N/A	- 30
Selenium	mg/Kg	0.5	<0.50	103	80 - 120	-	-	-	-
Étain	mg/Kg	5	<5.00	103	80 - 120	-	-	N/A	- 30
Zinc	mg/Kg	10	<10.0	102	80 - 120	-	-	1.18	- 30

Méthode d'analyse: Extraction à l'hexane et GC-FID / MA.410-Hyd.1.0 / ILCE-036						Date d'analyse: 2014-06-06			
						No séquence: CS424961			

Description	Unités	Blanc		% obtenu	limites (%)	-		Duplicata (2265755)	
		Limite de détection	Blanc			% obtenu	limites (%)	% écart	limites (%)
Hydrocarbures pétroliers C10-C50	mg/Kg	100	<100	113	80 - 120	-	-	N/A	0 - 30

Méthode d'analyse: Gravimétrie / MA.100- S.T. 1.1 / ILCE-030						Date d'analyse: 2014-06-06			
						No séquence: CS424962			

Description	Unités	-		% obtenu	limites (%)	-		Duplicata (2265755)	
		Limite de détection	Blanc			% obtenu	limites (%)	% écart	limites (%)
Siccité	%	-	-	-	-	-	-	2.09	0 - 20
Siccité	%	-	-	-	-	-	-	88.43	0 - 20

Annexe au certificat d'analyses (suite)

M881095 version 1

Description	Unités	Limite de détection	Blanc	Matériaux de référence		Récupération		Duplicata	
				% obtenu	limites (%)	% obtenu	limites (%)	% écart	limites (%)

Méthode d'analyse: GCMS / MA.400 - HAP 1.1 / ILCE-061								Date d'analyse: 2014-06-06	
								No séquence: CS424963	

Description	Unités	Limite de détection	Blanc		Matériaux de référence	Récupération		Duplicata	
			% obtenu	limites (%)		% obtenu	limites (%)	% écart	limites (%)
Acénaphthène	mg/Kg	0.1	<0.10	98.0	60 - 140	-	-	-	-
Acénaphthylène	mg/Kg	0.1	<0.10	95.0	60 - 140	-	-	-	-
Anthracène	mg/Kg	0.1	<0.10	101	60 - 140	-	-	-	-
Benzo (a) anthracène	mg/Kg	0.1	<0.10	101	60 - 140	-	-	-	-
Benzo (a) pyrène	mg/Kg	0.1	<0.10	93.0	60 - 140	-	-	-	-
benzo (b) fluoranthène	mg/Kg	0.1	<0.10	95.0	60 - 140	-	-	-	-
benzo(j)fluoranthène	mg/Kg	0.1	<0.10	84.0	60 - 140	-	-	-	-
Benzo [k] fluoranthène	mg/Kg	0.1	<0.10	98.0	60 - 140	-	-	-	-
Benzo (c) phénanthrène	mg/Kg	0.1	<0.10	94.0	60 - 140	-	-	-	-
Benzo (g,h,i) pérylène	mg/Kg	0.1	<0.10	92.0	60 - 140	-	-	-	-
Chrysène	mg/Kg	0.1	<0.10	107	60 - 140	-	-	-	-
Dibenzo (a,h) anthracène	mg/Kg	0.1	<0.10	89.0	60 - 140	-	-	-	-
Dibenzo (a,h) pyrène	mg/Kg	0.1	<0.10	107	40 - 160	-	-	-	-
Dibenzo (a,i) pyrène	mg/Kg	0.1	<0.10	91.0	40 - 160	-	-	-	-
Dibenzo (a,l) pyrène	mg/Kg	0.1	<0.10	90.0	40 - 160	-	-	-	-
Diméthyl-1,3 naphthalène	mg/Kg	0.1	<0.10	95.0	60 - 140	-	-	-	-
Diméthyl-7,12benzo(a)anthracène	mg/Kg	0.1	<0.10	83.0	40 - 160	-	-	-	-
Fluoranthène	mg/Kg	0.1	<0.10	96.0	60 - 140	-	-	-	-
Fluorène	mg/Kg	0.1	<0.10	97.0	60 - 140	-	-	-	-
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	mg/Kg	0.1	<0.10	89.0	60 - 140	-	-	-	-
Méthyl-1 naphthalène	mg/Kg	0.1	<0.10	93.0	60 - 140	-	-	-	-
Méthyl-2 naphthalène	mg/Kg	0.1	<0.10	97.0	60 - 140	-	-	-	-
Méthyl-3 cholanthrène	mg/Kg	0.1	<0.10	63.0	40 - 160	-	-	-	-
Naphtalène	mg/Kg	0.1	<0.10	98.0	60 - 140	-	-	-	-
Phénanthrène	mg/Kg	0.1	<0.10	101	60 - 140	-	-	-	-
Pyrène	mg/Kg	0.1	<0.10	94.0	60 - 140	-	-	-	-
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	mg/Kg	0.1	<0.10	99.0	60 - 140	-	-	-	-
% de récupération des étalons analogues	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d10-Acénaphthène	%	-	106	97	-	-	-	-	-
d10-Phénanthrène	%	-	107	97	-	-	-	-	-
d12-Benzo[ghi]pérylène	%	-	65	58	-	-	-	-	-



Annexe V

RAPPORT DE GÉOPHYSIQUE GPR INTERNATIONAL INC.

**MESURES SISMIQUES DE TYPE DOWNHOLE ET SONDAGE DE RÉSISTIVITÉ
ÉLECTRIQUE À L'USINE DOMTAR, WINDSOR (QC)**

Présenté à :

LABO S.M.
3350, boulevard Gene-H-Kruger
Trois-Rivières (Québec)
G9A 4M3

Présenté par :

GÉOPHYSIQUE GPR INTERNATIONAL INC.
100 - 2545 Delorimier
Longueuil (Québec)
J4K 3P7

JUIN 2014

M-14836



TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	LEVÉ SISMIQUE DOWNHOLE	2
	2.1 MÉTHODOLOGIE	2
	2.2 MODULES D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUES	3
	2.3 RÉSULTATS	5
3.	SONDAGE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE	8
	3.1 MÉTHODOLOGIE	8
	3.2 RÉSULTATS	9
4.	CONCLUSION.....	11

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	Localisation des mesures géophysiques	1
FIGURE 2	Schéma d'acquisition sismique par "downhole"	3
FIGURE 3	Sismogramme reconstitué pour les ondes P et S.....	6
FIGURE 4	Détermination des vitesses de l'onde de compression (V_P).....	6
FIGURE 5	Exemple de résultats de MASW.....	7
FIGURE 6	Résultats du sondage de résistivité électrique.....	10

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	Vitesses sismiques et modules d'élasticité dynamiques.....	7
-----------	--	---



1. INTRODUCTION

Au mois de mai 2014, Labo S.M. inc. mandatait Géophysique GPR International inc. pour effectuer des levés géophysiques par les méthodes de la sismique en forage « downhole » et par sondage de résistivité électrique à l'usine Domtar à Windsor, Québec. La figure 1 présente la localisation du site des mesures. Le but du levé downhole était de mesurer les vitesses de propagation des ondes sismiques en compression et en cisaillement afin de calculer les modules dynamiques d'élasticité mécanique des sols. Le sondage électrique avait pour but de mesurer la résistivité électrique des couches et du roc pour le design d'une future mise à la terre. Ces travaux cadrent dans les études préalables à l'ajout d'un turbogénérateur.

Les levés géophysiques ont été effectués le 22 mai 2014. MM. Nicolas Beaulieu, ing. jr, et Antoine Chagnon Larose, stag. ont procédé aux mesures.



FIGURE 1
Localisation des mesures géophysiques
(image fournie par Labo S.M. inc.)



2. LEVÉ SISMIQUE DOWNHOLE

2.1 Méthodologie

Labo S.M. inc. a vu à ce qu'au préalable un trou de forage (TF-02-14) de 11 m soit réalisé dans les dépôts meubles et le roc. Un tubage de PVC de 2 pouces de diamètre intérieur y a été installé. Un coulis de scellement a été injecté entre le tubage et les parois du trou de forage. Le roc a été rencontré à une profondeur de 3,2 mètres.

Les mesures sismiques ont été effectuées avec une sonde comprenant trois géophones orthogonaux (BHG-2) à fréquence de résonance de 15 Hz. Les données ont été recueillies avec un sismographe de type Terraloc MK 8 (de ABEM Instruments).

La source du signal sismique vertical et horizontal était une masse de 20 lb percutant plaque d'acier ou une portion de poutre d'acier en « H » ancrée dans le sol. Les sources étaient situées à 1,0 mètre du trou de forage. Un groupe de géophones (6) ont été déployés linéairement en surface, de 0,5 mètre de la source, vers le trou de forage et le dépassant. Ce dispositif a permis des corrections fines des temps d'initiation des enregistrements sismiques. Lorsque le signal était bruyant, des coups supplémentaires étaient produits et les enregistrements étaient sommés. Cette étape a été répétée au besoin afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. Les mesures ont été réalisées à chaque mètre de profondeur, de 0 jusqu'à 11 mètres.

Un mécanisme électro-mécanique de couplage (BHGC-1) a permis de maintenir en place la sonde sismique et d'assurer un bon couplage avec le tubage de PVC, pour une transmission adéquate de l'onde sismique entre la surface et les géophones. La figure 2 illustre schématiquement le principe général de ce type de sondage sismique.

La méthode downhole offre l'avantage de ne pas être affectée par des inversions de vitesses sismiques en profondeur, de même que par des effets de réfraction, contrairement à la méthode crosshole.

Afin de bien définir les vitesses de cisaillement près de la surface pouvant être masquées par le train de l'onde directe, un court levé de MASW a été effectué en surface. Ce dernier a été effectué avec le système MK 8 couplé au une trainée de 24 géophones de basse fréquence (5 Hz) espacés de 1 mètre.



Une description plus détaillée de la méthode est présentée dans *Multi-channel Analysis of Surface Waves*, Park, C.B., Miller, R.D. et Xia, J., Geophysics, Vol. 64, No. 3 (May-June 1999); pp. 800–808. Pour la méthode passive, on peut se référer à *Shear Velocity Profiles Obtained from Microtremor Array Data with an Example from Direct Fitting of SPAC Curves*, Asten, M.W., 2007, Proceedings of the 20th SAGEEP Conference, Denver, Environmental and Engineering Geophysical Society; ou aussi : *The Microtremor Survey Method*, Okada, H., S.E.G., Geophysical Monograph Series No. 12.

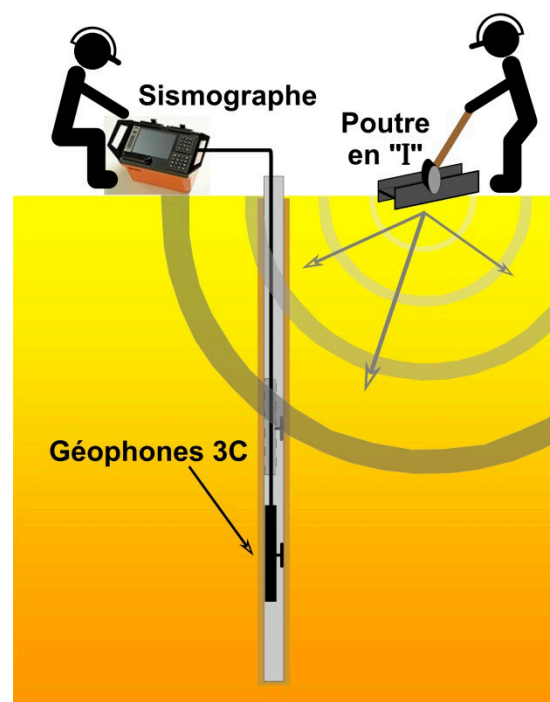


FIGURE 2
Schéma d'acquisition sismique par « downhole »

2.2 Modules d'élasticité dynamiques

L'objectif principal des mesures sismiques par downhole était le calcul des modules d'élasticité dynamiques des dépôts meubles et du roc. Les vitesses de propagation de deux types d'ondes sismiques étaient requises pour cette fin, soit celle de l'onde de compression (V_P) et celle de cisaillement (V_S). Il est assumé que les ondes sismiques se propageaient à travers des milieux isotropes. Ces dernières peuvent être définies par :



$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K+\frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

et

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

où

- V_p : vitesse de l'onde sismique de compression
- V_s : vitesse de l'onde sismique de cisaillement
- E : module d'Young
- ν : coefficient de Poisson
- μ : seconde constante de Lamé (ou module de cisaillement "G")
- K : module d'incompressibilité (ou d'élasticité isostatique)
- ρ : masse volumique du matériel

En connaissance des valeurs de V_p , V_s et de la densité (masse volumique) des matériaux, il est possible de calculer les modules d'élasticité mécanique de ceux-ci.

Le coefficient de Poisson (sans dimension) est calculé directement à partir des valeurs de V_p et de V_s , indépendamment de la masse volumique du matériel. Il exprime le rapport des déformations transverse et longitudinale. Sa détermination dynamique (à travers les vitesses des ondes sismiques) peut être traduite par :

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

Les modules d'Young (E), d'incompressibilité (K) et de cisaillement (G ou μ), requièrent la valeur de la masse volumique (ρ) du matériel évalué.

Le module d'Young (d'élasticité longitudinale ou de traction) est le rapport uniaxial de contrainte-déformation. Considérant les données sismiques, il peut être calculé comme suit :

$$E_{dyn} = \frac{\rho V_p^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} = 2\rho V_s^2 (1+\nu) = \mu \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}$$

Le module d'incompressibilité (K) est le rapport compression-déformation sous pression hydrostatique simple. Son évaluation dynamique peut être obtenue par les relations suivantes :



$$K_{dyn} = \rho \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) = \frac{E_{dyn}}{3(1-2\nu)}$$

Le module de cisaillement, ou la seconde constante de Lamé, est le rapport contrainte-déformation pour un cisaillement simple. Son évaluation dynamique peut être obtenue par :

$$G_{dyn} = \mu_{dyn} = \rho V_S^2 = \frac{E_{dyn}}{2(1+\nu)}$$

2.3 Résultats

Pour une reconnaissance adéquate des ondes sismiques d'intérêt, les enregistrements individuels ont d'abord été concaténés pour former des sismogrammes reconstitués. Ils présentent des vues d'ensemble permettant d'identifier les signaux cohérents et même de reconnaître des niveaux réflecteurs. La figure 3 illustre des sismogrammes reconstitués de la composante latérale pour des impacts vertical (image de gauche) et latéral (l'image de droite), lesquels montrent les ondes sismiques de compression et de cisaillement. La figure 4 montre un graphique des temps d'arrivé de l'onde de compression sur lequel on peut calculer la vitesse de cette dernière (V_P) par l'inverse de la pente de la droite obtenue par régression linéaire pour chacune des couches identifiées. La figure 5 présente les résultats du levé MASW ayant été utilisés pour calculer les vitesses de cisaillement près de la surface.

Le tableau 1 présente les vitesses sismiques (V_P et V_S) mesurées sous forme numérique, ainsi que les modules d'élasticité dynamiques calculés à partir de celles-ci. Les masses volumiques utilisées pour ces calculs ont été fournies par Labo S.M.



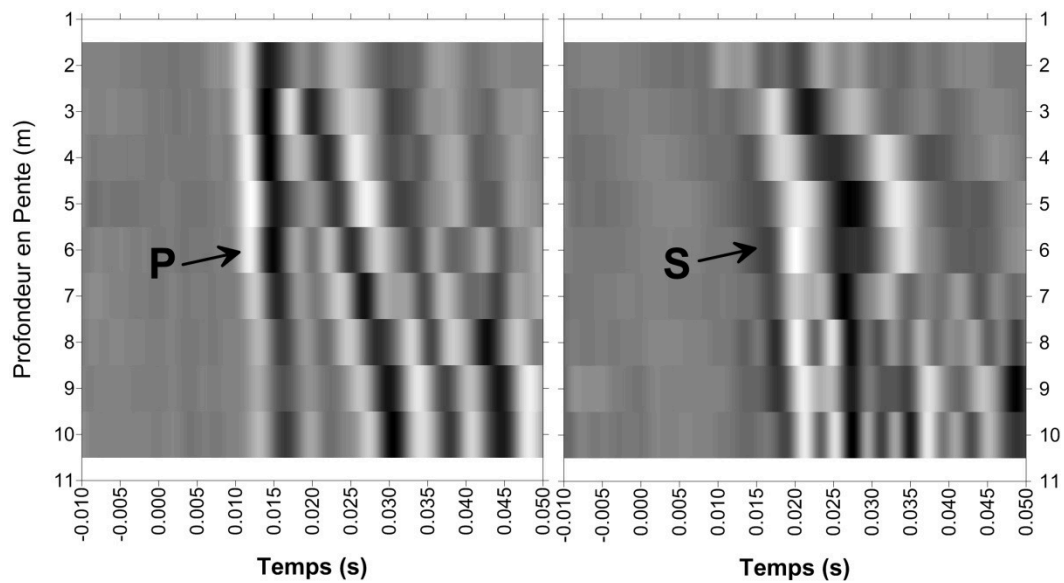


FIGURE 3
Sismogrammes reconstitués pour les ondes P et S

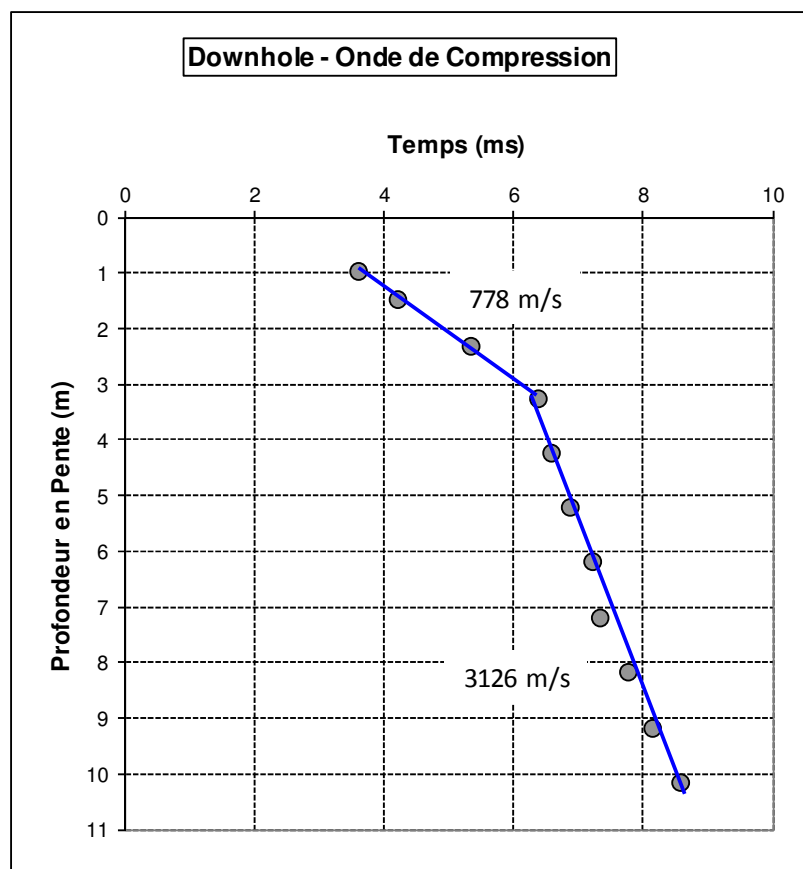


FIGURE 4
Détermination des vitesses de l'onde de compression (V_p)



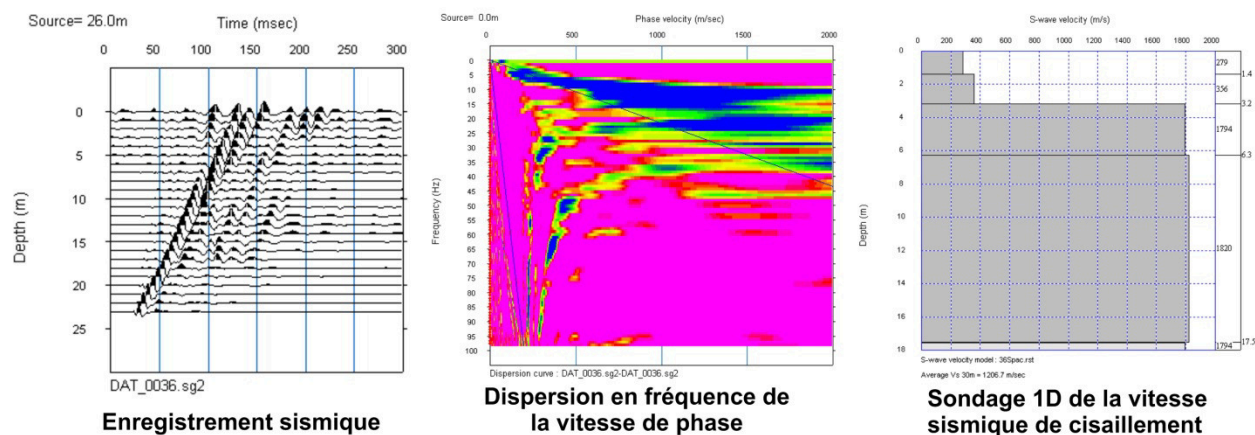


FIGURE 5
Exemple de résultats de MASW

Tableau 1 : Vitesses sismiques et modules d'élasticité dynamiques

Profondeur (m)		Masse Volumique*	V_P	V_S	Poisson	E_{dyn}	K_{dyn}	G_{dyn}
De	À	(kg/m^3)	(m/s)	(m/s)	()	(GPa)	(GPa)	(GPa)
0.00	1.40	2141	778.2	298.8	0.41	0.54	1.04	0.19
1.40	3.18	2243	778.2	357.4	0.37	0.78	0.98	0.29
3.18	10.13	2855	3126.3	1908.3	0.20	25.02	14.04	10.40

* : valeurs fournies par Labo SM

Le levé MASW de surface effectué sur le site identifie deux courbes de dispersion en fréquence à l'endroit du forage TF-02-14 (voir figure 5). Ce phénomène est observé lorsque les couches du sous-sol ne forment pas un espace homogène horizontal le long du profil mesuré. Il est probable que la topographie du roc soit discontinue (excavation, faille, etc.) le long de l'axe de 23 mètres sur lequel était installé le dispositif sismique et est centré le forage TF-02-14.



3. SONDAGE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

3.1 Méthodologie

La méthode du sondage électrique consiste à injecter un courant électrique (I) entre deux électrodes (A et B) et puis de mesurer la différence de potentiel électrique ($V_M - V_N$) entre deux autres électrodes (M et N). Le rapport entre la différence de potentiel et le courant donne une résistance ($R = \Delta V / I$), ce qui permet de déduire la résistivité apparente des sols (ρ_a).

Pour les sondages électriques, l'équation générale est :

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Dans le cas particulier de la configuration Schlumberger, l'équation générale peut être simplifiée dû à la symétrie du dispositif ($AM=BN$ et $AN=BM$). Comme le sol est un milieu hétérogène la résistivité mesurée est la résistivité apparente (ρ_a) de la sous-section investiguée. Le facteur K est un facteur géométrique, propre au dispositif Schlumberger qui permet de convertir la résistance mesurée en résistivité. Voici donc la simplification de l'équation ci-haut pour la configuration Schlumberger :

$$\rho_{app} = KR \quad \text{avec} \quad K = \pi \frac{AM * AN}{MN}$$

Un système Terrameter SAS 1000 d'ABEM a été utilisé pour l'acquisition des données. Cette dernière a été réalisée selon la configuration d'électrodes Schlumberger.

Les électrodes de potentiel (M et N) ont été fixées à 0,125 m de part et d'autre du centre de mesure. La distance des électrodes de courant (A et B) à partir du centre a été incrémenté à chaque mesure jusqu'à 90 mètres. Plus l'espacement entre A et B augmente, plus la section de sol investiguée est grande et plus la profondeur d'investigation est grande. Trois mesures de résistivité ont été effectuées pour chaque espacement d'électrodes afin de vérifier la répétitivité des valeurs obtenues.

Les données de résistivité recueillies sur le terrain ont été interprétées avec les logiciels d'inversion numérique RES2DINV (de Geotomo Software) et IPI2win (de Moscow State University) afin d'assurer la robustesse des algorithmes d'inversion. L'inversion des données permet de générer



itérativement un modèle de la résistivité en fonction de la profondeur du terrain sondé. Étant donnée l'infinité de solutions possibles avec les techniques d'inversion numérique, les modèles générés sont contraints avec les informations connues du site à l'étude (i.e. descriptions de forages).

3.2 Résultats

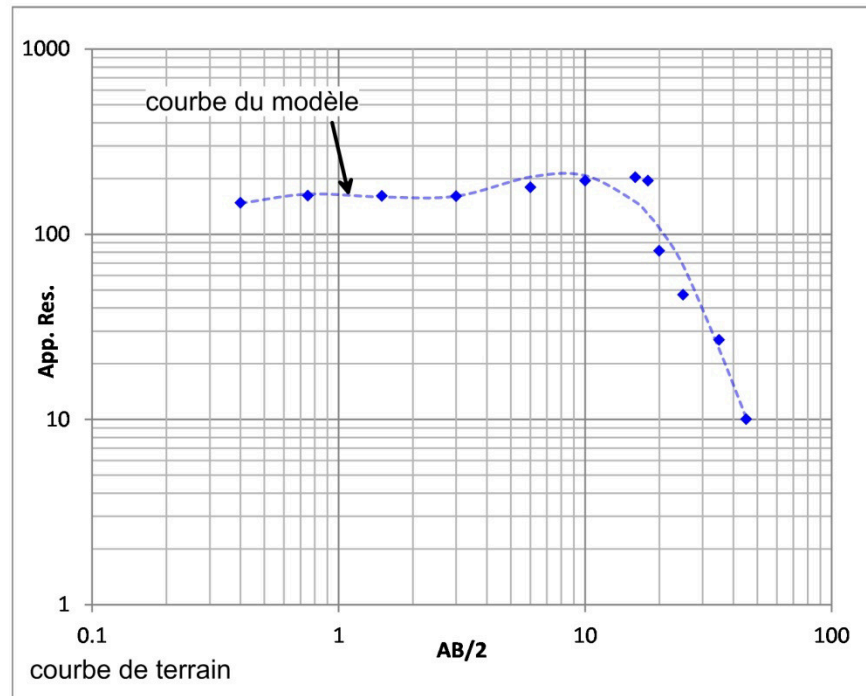
La répétitivité des mesures sur le terrain était excellente pour les faibles espacements d'électrodes. La qualité des mesures était décroissante au fur et à mesure que l'espacement d'électrodes de courant augmentait. Ceci indique une mauvaise propagation ou des pertes de courant. Il est fréquent dans des sites urbains ou industriels que les courants injectés trouvent un chemin de propagation préférentiel sur des structures souterraines.

Les résultats du sondage électrique sont présentés à la figure 6. Les données brutes montrent une forte diminution de la résistivité apparente avec des grands espacements des électrodes de courant. Il en résulte une mauvaise convergence de l'inversion numérique (erreur de convergence RMS = 22,7%) et des valeurs de résistivité convergeant vers zéro en profondeur. Une telle tendance est géologiquement impossible, d'autant plus que le roc sur place est un roc volcanique sain, lequel devrait avoir des valeurs de résistivité de l'ordre de 1000 à 10 000 Ohm.m. Des fuites de courant, tel que décrit dans le dernier paragraphe, et un sous-sol non homogène, tel que confirmé par les résultats du levée de MASW, pourraient contribuer à un tel comportement des courants injectés. Une tendance à la hausse est tout de même perceptible au contact du roc avec des valeurs de résistivité de l'ordre de 800 Ohm.m. Il est probable que la résistivité du roc soit plus élevée que cette valeur, mais elle n'a pu être déterminée en raison de la baisse de la résistance observée avec de grands espacements d'électrodes.

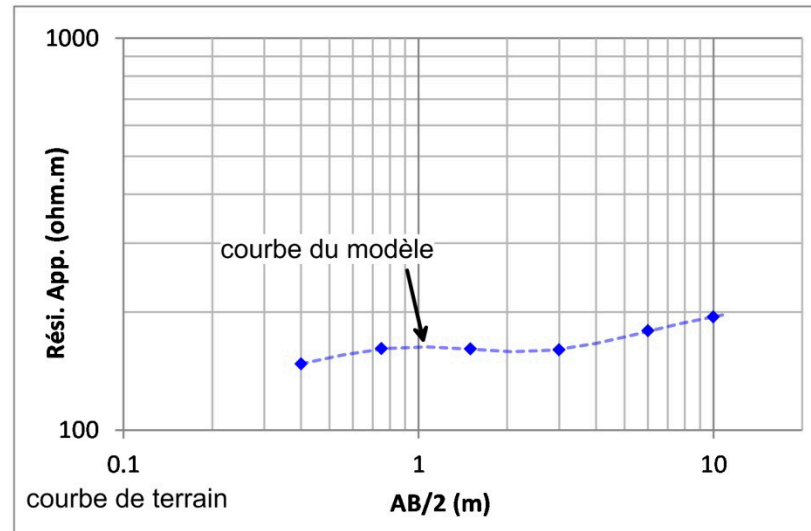
Afin d'améliorer la convergence des résultats, une inversion numérique a été effectuée sur les données tronquées de manière à exclure les points influencés par la baisse de résistivité. Ceci a permis de bien définir un modèle de résistivité pour les dépôts de surface. Le modèle retenu (erreur de convergence RMS = 0,16%) a été contraint pour respecter les changements lithologiques observés dans le forage TF-02-14. Ce modèle est présenté sous la forme d'un tableau à la figure 6. Les valeurs montrent des résistivités se situant entre 126 et 191 Ohm.m pour les dépôts de surface. La résistivité électrique du roc serait supérieure à 770 Ohm.m.



Données brutes

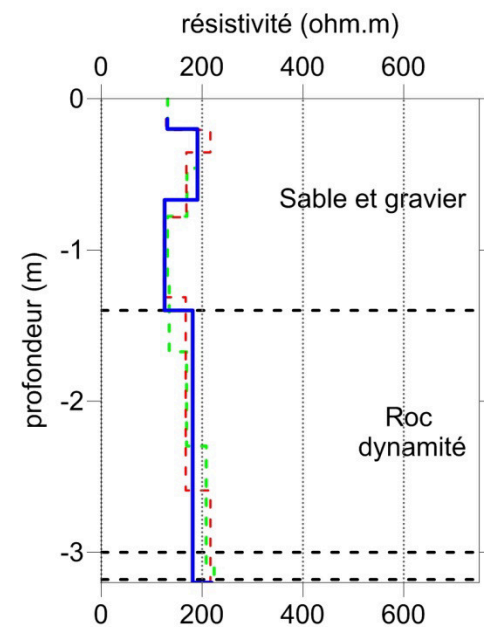
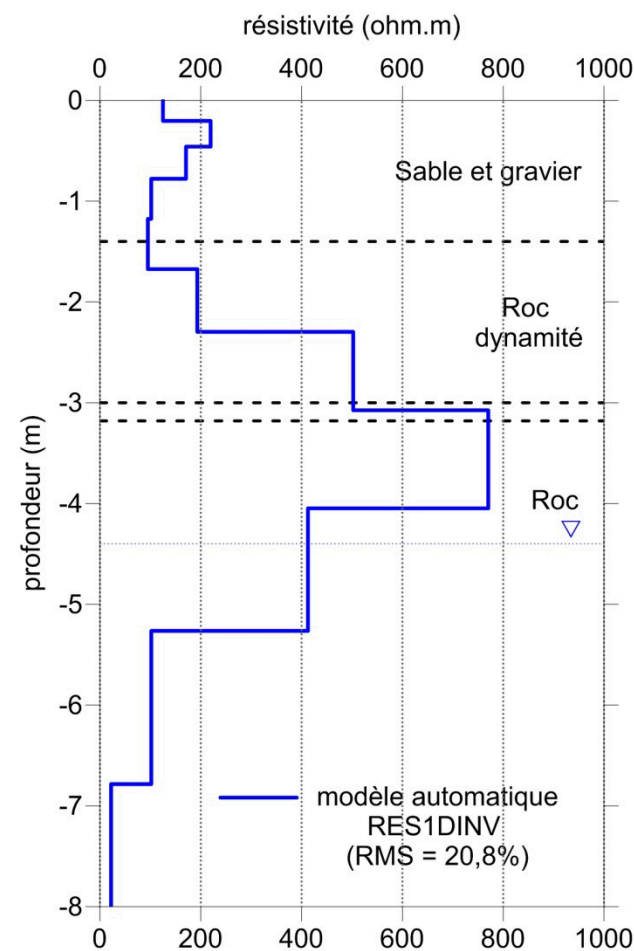


Données tronquées



Modèle de résistivité

Lithologie	Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)
Remblai	0.0	131
	0.2	131
	0.2	191
	0.7	191
	0.7	126
Roc dynamité	1.4	181
	3.2	181
Roc sain	>3.2	> 770



- modèle contraint iPi2WIN (RMS = 0,16%)
- - - modèle automatique iPi2WIN (RMS = 0,13%)
- - - modèle automatique RES1DINV (RMS = 0,13%)

Notes:

- Levé effectué par géophysique GPR International inc. le 22 mai 2014.
- Configuration d'électrodes Schlumberger, centré aux coordonnées X : 2107 m, Y : 4850 m (système local).
- Se référer au rapport M-14836 (juin 2014) de Géophysique GPR pour l'explication des résultats et la méthodologie.

FIGURE 6

Résultats du sondage de résistivité électrique

Site: Usine Domtar, Windsor, QC Contrat: M-14836
 Client: Labo S.M. Date du levé: 22 mai 2014
 Dessin: Daniel Campos Halas

4. **CONCLUSION**

Des levés sismiques de type downhole ont été réalisés à l'usine de Domtar à Windsor, Québec, pour mesurer les vitesses de propagation des ondes sismiques de compression et de cisaillement. Celles-ci ont servi aux calculs des modules d'élasticité dynamiques des matériaux meubles sur 11 mètres d'épaisseur au long du forage TF-02-14.

Un sondage de résistivité électrique a également été effectué afin de mesurer la résistivité des sols et du roc en périphérie du même forage.

Les vitesses sismiques mesurées sont typiques pour les matériaux en place et corrélèrent bien avec les paramètres mesurés en forage (Nspt – RQD). Les résultats du levé MASW de surface indiquent une discontinuité dans la topographie du socle rocheux à l'emplacement du sondage.

Des fuites possibles de courant n'ont pas permis de bien définir la résistivité électrique du roc. Il a été néanmoins possible de bien caractériser les propriétés électriques des dépôts de surface. Advenant la nécessité de bien mesurer la résistivité électrique du roc, un levé supplémentaire dans un secteur de la propriété éloigné des installations de l'usine serait nécessaire.

Ce rapport a été rédigé par Daniel Campos Halas, ing., M.Sc.A.

Daniel Campos Halas, ing, M.Sc.A.
Chargé de projets
(Numéro de membre O.I.Q: 130386)



De la science • aux solutions • aux réalisations



SMⁱ

groupes**sm**.com