

Rapport no 4350-57-01

**ÉTUDE GÉOTECHNIQUE**

**Aménagement de trois cellules d'entreposage  
des poussières de l'usine Ispat-Sidbec inc.  
Contrecoeur (Québec)**

**Roche ltée Groupe-Conseil**

**Dossier no 4350-57  
Septembre 2001**



**LABORATOIRES  
D'EXPERTISES  
DE QUÉBEC LTÉE**

2320, rue de Celles, Québec (Québec) CANADA G2C 1X8  
Tél. : (418) 845-0858 • Téléc. : (418) 845-0300 • leq@globetrotter.qc.ca



## TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 MÉTHODE DE RECONNAISSANCE .....	2
2.1 Travaux de chantier .....	2
2.2 Travaux de laboratoire.....	3
2.3 Mise en rapport.....	3
2.4 Arpentage.....	4
3.0 NATURE ET PROPRIÉTÉS DES SOLS .....	5
3.1 Terre végétale .....	5
3.2 Sol pulvérulent.....	5
3.3 Sol cohérent.....	6
4.0 EAU SOUTERRAINE.....	9
5.0 COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS .....	10
5.1 Généralités.....	10
5.2 Stabilité des digues .....	10
5.3 Tassement des digues .....	11
5.4 Construction des digues.....	12
5.5 Drainage.....	13
5.6 Matériaux d'excavation.....	13
5.7 Fond des cellules .....	15

**ANNEXE "A":** Rapports de sondages

**ANNEXE "B":** Résultat des analyses granulométriques et essais de consolidation

**ANNEXE "C":** Analyses de stabilité

**ANNEXE "D":** Plan de localisation des sondages



## 1.0 INTRODUCTION

Les services professionnels des consultants en géotechnique, en hydrogéologie et en ingénierie des sols et matériaux de Laboratoires d'Expertises de Québec ltée ont été retenus par Roche ltée Groupe-Conseil en vue d'effectuer une étude géotechnique dans le cadre du projet d'aménagement de trois cellules d'entreposage des poussières sur le site de l'usine Ispat-Sidbec inc. à Contrecoeur.

Cette étude a pour objectifs de vérifier la nature des sols en place, de déterminer quelques-unes de leurs propriétés physiques et mécaniques, de mesurer la profondeur de la nappe d'eau souterraine et d'effectuer toutes mesures appropriées pour assister le concepteur dans la préparation des plans et devis. Le mandat de L.E.Q. a été défini dans une offre de services en date du 17 mai 2001. L'acceptation par Roche ltée Groupe-Conseil a fait l'objet du bon de commande portant le n° C015231 daté du 28 juin 2001.

Nous vous transmettons donc, dans ce rapport, tous les résultats des travaux de chantier et des essais en laboratoire, ainsi que nos commentaires et recommandations sur l'intégration du projet aux types de sols rencontrés sur le site étudié.

## 2.0 MÉTHODE DE RECONNAISSANCE

### 2.1 Travaux de chantier

Les travaux de reconnaissance au chantier ont été exécutés en deux périodes, soit le 13 juin pour les sondages de surface, soit du 18 au 21 juin pour les sondages profonds.

Au total, treize puits d'exploration, identifiés P-1 à P-13, ont été réalisés à l'aide d'une pelle hydraulique montée sur chenilles de marque Caterpillar, modèle 330C, à des profondeurs variant entre 2,40 et 4,00 mètres. Ensuite, trois forages profonds, identifiés FR-1 à FR-3, ont été effectués à l'aide d'une foreuse à tarières évidées de fabrication artisanale et de calibre Longyear 38, qui était montée sur chenilles. Les trois forages ont atteint une profondeur de 15,00 mètres environ. La foreuse était équipée de tous les accessoires requis pour l'échantillonnage des sols et le carottage du socle rocheux, s'il y a lieu.

Des échantillons de sols remaniés ont été prélevés à l'aide du carottier fendu standardisé de 51 mm de diamètre extérieur, et l'indice "N" de l'essai de pénétration standard a été enregistré par la même occasion selon la norme NQ 2501-140.

Des échantillons d'argile intacte ont été prélevés dans chacun des forages à l'aide de tubes minces de type Shelby de 71 mm de diamètre intérieur.

Enfin, la résistance au cisaillement à l'état non drainé de l'argile a été mesurée au chantier à l'aide d'un scissomètre Nilcon muni d'ailettes faisant 65 X 130 millimètres. Les essais au scissomètre ont été réalisés à intervalle d'un mètre en poussant le train de tiges muni des ailettes avec la tête hydraulique de la foreuse. Le profil scissométrique a été réalisé à côté du forage, à 1,50 mètre environ.



## 2.2 Travaux de laboratoire

Tous les échantillons prélevés ont été transportés à notre laboratoire de Québec où une identification visuelle a été effectuée sur chacun d'entre eux par l'ingénieur soussigné.

Sur des échantillons jugés représentatifs des différentes couches de sol traversées, nous avons effectué les essais d'identification suivants:

- Quatre (4) analyses granulométriques par tamisage mécanique;
- Cinq (5) sédimentométries;
- Trois (3) essais de consolidation;
- Douze (12) teneurs naturelles en eau;
- Neuf (9) limites de liquidité et de plasticité.

Tous les échantillons non inutilisés pour fins d'analyses demeureront entreposés à notre laboratoire pendant une période de trois mois à partir de la date de transmission de ce rapport. Ce laps de temps écoulé, les échantillons seront détruits à moins d'avis contraire de la part de Roche ltée Groupe-Conseil.

## 2.3 Mise en rapport

Les rapports de forage et de puits d'exploration présentés à l'annexe "A" contiennent tous les renseignements obtenus sur le chantier ainsi qu'une indication sur la profondeur des échantillons sur lesquels les différents essais de laboratoire ont été effectués.



L'annexe "B" présente les résultats des analyses granulométriques et sédimentométriques sur les planches B-1 à B-4. Les résultats des trois essais de consolidation sont également présentés dans cet annexe sur les planches B-5 à B-7.

Les analyses de stabilité contre la rupture des digues projetées en périphérie des cellules ont donné des schémas de rupture présentés à l'annexe "C".

La localisation des puits d'exploration et des forages est présentée sur les dessins 4350-57-01 et 4350-57-02 de l'annexe "D".

Tous les résultats, mesures, symboles exprimés dans ce rapport le sont suivant le système international SI.

#### 2.4 Arpentage

La localisation des forages et des puits d'exploration sur le terrain a été faite de façon approximative par notre technicien à partir des axes de déboisement effectués sous la responsabilité de Roche ltée Groupe-Conseil. Une fois les travaux de terrain complétés, une équipe d'arpentage sous la responsabilité de Roche ltée Groupe-Conseil a effectué la localisation précise des forages et des puits d'exploration ainsi qu'un relevé topographique du terrain naturel. Ces relevés de terrain nous ont été transmis par Roche ltée Groupe-Conseil par courrier électronique, ce qui a fait l'objet des dessins 4350-57-01 et 4350-57-02 de l'annexe "D". Les élévations de la surface du terrain naturel à l'endroit de chacun des forages et des puits d'exploration ont été prises par interpolation ou extrapolation sur ce relevé topographique en utilisant les données les plus près des sondages.

### 3.0 NATURE ET PROPRIÉTÉS DES SOLS

D'après les résultats des forages FR-1 à FR-3 et des puits d'exploration P-1 à P-13, les dépôts de sols suivants ont été rencontrés:

#### 3.1 Terre végétale

Une mince couche de terre végétale a été rencontrée à la surface de chacun des puits d'exploration. Son épaisseur varie entre 100 et 300 mm pour une valeur moyenne de l'ordre de 160 mm.

#### 3.2 Sol pulvérulent

Sous la couche de terre végétale, à l'endroit des puits d'exploration ou immédiatement en surface pour ce qui est des forages, un dépôt de sol pulvérulent généralement constitué de sable fin à moyen brun contenant des traces à un peu de silt et de gravier a été rencontré. Occasionnellement, le sable fait place à du silt sableux. Ce dépôt se présente comme suit:

Puits	Matériau	Profondeur (m)	Épaisseur (m)
P-1	Sable	0,10 à 0,85	0,75
	Silt sableux	0,85 à 1,52	0,67
P-2	Sable	0,10 à 0,85	0,75
P-3	Silt sableux	0,23 à 1,57	1,34
P-4	Sable	0,16 à 1,05	0,89
P-5	Sable	0,10 à 1,10	1,00
P-6	Sable	0,18 à 1,18	1,00
P-7	Sable	0,30 à 1,22	0,92

Puits	Matériau	Profondeur (m)	Épaisseur (m)
P-8	Sable	0,20 à 1,52	1,32
P-9	Sable	0,20 à 1,52	1,32
P-10	Sable	0,10 à 1,35	1,25
P-11	Sable	0,10 à 1,00	0,90
P-12	Sable	0,15 à 1,15	1,00
P-13	Sable	0,15 à 2,10	1,95

L'épaisseur moyenne du dépôt est de 1,16 mètre.

Les résultats des analyses granulométriques effectuées sur quatre échantillons représentatifs du dépôt de sable sont présentés sur les planches B-1 et B-2 de l'annexe "B". Ces échantillons contiennent entre 0,2 et 17,6% de gravier, entre 70,8 et 96,1% de sable et entre 2,9 et 11,4% de silt. La teneur naturelle en eau mesurée sur deux échantillons de silt est égale à 25,1% et 25,7% aux puits P-1 et P-3 respectivement.

### 3.3 Sol cohérent

Sous la couche de sable, à des profondeurs variant entre 0,85 et 2,10 mètres, soit à partir d'une profondeur moyenne de 1,38 mètre, un important dépôt de sol cohérent constitué d'argile silteuse grise a été rencontré jusqu'à 15,00 mètres de profondeur, soit à l'arrêt des forages. La consistance de l'argile silteuse varie de moyenne à raide selon les valeurs de la résistance au cisaillement mesurée qui varie de 39,4 à 64,6 kPa.



Les résultats des analyses sédimentométriques effectuées sur cinq échantillons représentatifs du dépôt d'argile silteuse sont présentés sur les planches B-3 et B-4 de l'annexe "B". Ces échantillons contiennent entre 1,0 et 3,2% de sable, entre 28,0 et 37,4% de silt et entre 60,1 et 68,8% d'argile.

La teneur naturelle en eau de l'argile et les limites de consistance varient selon les mesures suivantes:

Sondage	Echantillon	Profondeur (m)	W <sub>c</sub>	LL	LP	IP	I <sub>L</sub>
P-1	4-VR	1,52 à 3,60	36,1				
FR-1	3-TM	5,56 à 6,27	62,7	56,3	21,9	34,4	1,19
	6-TM	10,12 à 10,83	63,4	65,0	23,9	41,1	0,96
	9-TM	14,33 à 15,04	57,2	70,3	25,9	44,4	0,70
FR-2	2-TM	5,55 à 6,26	59,1	57,7	20,9	36,8	1,04
	5-TM	10,11 à 10,82	60,8	56,4	24,3	32,1	1,14
	8-TM	14,33 à 15,04	67,1	65,0	23,7	41,3	1,05
FR-3	2-TM	5,15 à 5,86	62,8	60,6	24,9	35,7	1,06
	6-TM	9,40 à 10,11	62,2	62,4	24,5	37,9	0,99
	10-TM	14,32 à 15,03	64,8	63,7	24,1	39,6	1,03

- où: W<sub>c</sub>: Teneur naturelle en eau  
 LL: Limite de liquidité  
 LP: Limite de plasticité  
 I<sub>p</sub>: Indice de plasticité  
 I<sub>L</sub>: Indice de liquidité

L'indice de plasticité moyen est égal à 38,1%. À partir de ce résultat, une correction de Bjerrum de 0,88 devra être appliquée sur chacune des valeurs de la résistance au cisaillement de l'argile.

Les trois essais de consolidation réalisés sur des échantillons provenant du forage FR-2 ont donné les résultats suivants:

Échantillon	Profondeur (m)	$\sigma'_p$ (kPa)	$e_0$	$C_s$	$C_c$	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )
2-TM	5,85	200	1,761	0,052	1,303	15,8
5-TM	10,39	200	1,737	0,040	1,508	15,9
8-TM	14,63	200	1,711	0,031	1,103	15,9

Ces résultats indiquent que le dépôt d'argile est surconsolidé d'une valeur de l'ordre de 130 kPa.

#### 4.0 EAU SOUTERRAINE

La nappe d'eau souterraine a été repérée dans chacun des puits d'exploration aux profondeurs et élévations suivantes:

Puits	Profondeur (m)	Élévation (m)
P-1	Probablement 1,50	Probablement 17,77
P-2	0,60	17,88
P-3	Probablement 1,57	Probablement 17,55
P-4	0,65	18,18
P-5	0,76	18,12
P-6	1,18	17,65
P-7	0,91	18,06
P-8	1,52	17,58
P-9	0,85	18,22
P-10	1,35	17,89
P-11	1,00	18,08
P-12	1,15	17,94
P-13	1,40	17,95

Aux puits P-1 et P-3, le niveau d'eau a été établi au contact des dépôts de sols pulvérulents et cohérents, soit à la surface du dépôt d'argile silteuse grise. Tous ces niveaux d'eau sont représentatifs de la période de l'année où ils ont été mesurés. Toutefois, il est important de mentionner que le niveau d'eau souterraine peut varier de plusieurs décimètres selon les saisons et l'importance des précipitations.

## 5.0 COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 Généralités

Il est projeté l'aménagement de trois cellules d'entreposage des poussières à l'ouest et au sud de la cellule existante. De forme carrée, elles feront sensiblement 150 mètres de côté. Les cellules seront aménagées en déblai-remblai en excavant 2,00 mètres dans le terrain naturel, puis en remblayant sur une hauteur de 5,00 mètres en périphérie des cellules, pour obtenir une dénivellation entre le fond des bassins et le sommet des digues de 7,00 mètres. Il est projeté mettre en place une géomembrane dans le fond des bassins et sur les pentes intérieures des digues pour obtenir l'étanchéité recherchée.

### 5.2 Stabilité des digues

La stabilité des digues contre la rupture sur la fondation argileuse a été examinée pour une digue faisant 5,00 mètres de hauteur retenant des résidus en amont sur la pleine hauteur de la digue. Les paramètres d'étude suivants ont été retenus:

Description	Paramètres		
	Cohésion $c'$ (kPa)	Frottement $\phi'$	Poids volumique $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Remblai de digue	0	33°	18
Poussières	0	33°	18
Sable de fondation	0	32°	18
Argile de fondation	37,8 à 54,3	0	17

Une correction de Bjerrum égale à 0,88 a été appliquée sur la résistance au cisaillement de l'argile. Les analyses ont été effectuées pour une pente de digue le plus défavorable faisant 2 à l'horizontale pour 1 à la verticale. Les calculs de stabilité ont été effectués avec le logiciel informatique SLOPE/W utilisant la méthode de calcul de Bishop modifié.

L'analyse a été réalisée dans des conditions statiques et dynamiques, en utilisant une accélération horizontale correspondant à 0,10 g, "g" correspondant à l'accélération gravitationnelle. Les facteurs de sécurité contre la rupture suivants ont été obtenus:

Hauteur de digue (m)	Conditions	
	Statique	Dynamique
8,0	1,56	1,36
9,0	1,46	1,29

Comme les digues feront 5,00 mètres de hauteur par rapport au terrain naturel et 7,00 mètres de hauteur par rapport au fond des cellules, le facteur de sécurité contre la rupture est nettement supérieur à la valeur minimale recherchée de 1,50 en condition statique et de 1,10 en condition dynamique.

### 5.3 Tassement des digues

La présence d'un important dépôt d'argile est susceptible de produire des tassements importants sous la charge des digues et des poussières qui y seront entreposées. Ces tassements s'échelonneront sur plusieurs dizaines d'années compte tenu de la faible perméabilité du dépôt d'argile. Les forages ont atteint 15,00 mètres de profondeur maximum, mais pour fin de tassement, l'hypothèse a été faite que le dépôt d'argile atteignait 60,00 mètres, ce qui est très plausible dans la région.

Il a été mesuré que le dépôt d'argile possédait un degré de surconsolidation de l'ordre de 130 kPa ce qui signifie que toute charge appliquée au dépôt, inférieure à cette valeur, induira des tassements faibles, alors qu'au delà, ils seront importants puisque l'augmentation de contraintes dans le sol touche au domaine du normalement consolidé de l'argile.

Aussi, les tassements ont-ils été calculés pour une digue faisant 9,00 mètres de hauteur, correspondant à la hauteur maximale de digue que le dépôt d'argile peut supporter tout en maintenant un facteur de sécurité contre la rupture de la digue acceptable. Ensuite, les calculs ont été effectués pour la hauteur projetée des digues, soit 5,00 mètres. Les résultats suivants ont été obtenus:

Hauteur des digues (m)	Tassement (mm)
9,00	1600
5,00	195

Le concepteur devra tenir compte de ces tassements dans l'établissement des pentes des conduites. De plus, si la masse volumique des poussières humides est la même que celle des matériaux utilisés pour la construction des digues, les tassements du centre de la cellule devraient être de même grandeur.

#### 5.4 Construction des digues

Les digues des cellules pourront être construites avec des pentes intérieures et extérieures faisant 2 à l'horizontale pour 1 à la verticale. Elles seront stables sur la fondation argileuse. Comme les cellules auront une géomembrane sur la pente amont, il n'y aura pas d'eau d'exfiltration de sorte qu'aucune précaution n'est à prendre pour la stabilité du pied aval des digues. Peu importe les sols utilisés pour la confection des digues, la pente extérieure sera stable. Toutefois, on devra la recouvrir de terre végétale ensemencée pour prévenir l'érosion.

Quant à la pente intérieure, elle devra être ajustée pour tenir compte de la mise en place de la géomembrane. La pente devra être calculée et ajustée en tenant compte de la friction sol-sol, sol-membrane et membrane-sol de protection.

La terre végétale qui recouvre le terrain naturel devra être excavée avant la mise en place de la première couche de remblai pour l'érection des digues. Le sol utilisé pour la construction des digues devra être mis en place par couches de 300 mm d'épaisseur maximale compactée chacune à au moins 90% de la masse volumique sèche maximale déterminée à l'essai Proctor modifié.

### 5.5 Drainage

Les treize (13) puits d'exploration ont révélé la présence de la nappe phréatique à 1,10 mètre de profondeur en moyenne. Comme le fond des cellules est projeté à 2,00 mètres de profondeur, il est recommandé que la nappe phréatique soit rabattue jusqu'au contact avec le dépôt d'argile en aménageant des fossés de drainage, d'une part, en périphérie des cellules et d'autre part, au centre des cellules, parallèlement les uns aux autres, pour drainer l'eau interstitielle présente dans le dépôt de sols pulvérulents. Par ailleurs, compte tenu de la très faible perméabilité du dépôt d'argile silteuse, les fossés ne pourront drainer l'argile.

### 5.6 Matériaux d'excavation

Les matériaux d'excavation seront de nature très différente comme il a été présenté déjà. Une fois la terre végétale enlevée, les sols pulvérulents constitués principalement de sable contenant des traces à un peu de silt pourront être récupérés pour la confection des digues. Les sols devront au préalable avoir été drainés par des fossés aménagés en nombre suffisant pour rabattre la nappe jusqu'au contact avec le



dépôt d'argile silteuse. Le silt sableux présent occasionnellement comme aux puits P-1 et P-3 possède une teneur naturelle en eau de l'ordre de 25%, ce qui est élevé. Aussi, faudra-t-il l'assécher pour le récupérer dans la construction des digues. L'aménagement des fossés de drainage ne sera pas suffisant pour réduire la teneur en eau du silt. C'est plutôt lors de la mise en place par couches minces sur la digue, avec des conditions climatiques adéquates, qu'il sera possible de réduire sa teneur en eau. Sinon, il devra être placé au rebut.

Quant aux sols cohérents constitués d'argile silteuse, ils ne pourront être récupérés pour la confection des digues. En effet, avec des teneurs naturelles en eau de l'ordre de 40% (puits P-1 et études antérieures) l'argile ne peut être réutilisée telle quelle, à moins que sa teneur en eau soit réduite à moins de 25% et même 20%, soit à une valeur voisine de la limite de plasticité de l'argile qui varie entre 20,9% et 25,9% pour une valeur moyenne de 23,8%. Toutefois, la réduction de la teneur en eau d'un tel matériau n'est pas facile en regard des conditions climatiques régionales. Il faut beaucoup de soleil et du vent pour que les opérations de pétrissage de l'argile avec les compacteurs à pieds-de-mouton, sur l'argile placée en couches minces, soient efficaces, ce qui est loin d'être assuré. Les mois de mai et juin se prêtent beaucoup plus à ce genre d'opération que les mois de septembre et octobre.

Par ailleurs, il est possible d'améliorer les conditions de mise en place de l'argile en y ajoutant de la chaux vive. En effet, la plasticité de l'argile est suffisamment élevée pour que la chaux ait un effet stabilisateur. Toutefois, des essais en laboratoire seraient nécessaires pour en mesurer tous les effets. De plus, l'usage de chaux vive exige des mesures de sécurité spéciales pour la protection des travailleurs.



Compte tenu de tous ces facteurs, il serait préférable de prévoir en conception, la mise au rebut de l'argile et si les conditions sont favorables en construction pour la récupération de l'argile ou d'une partie, les quantités de matériaux prévus pour la construction des digues seront ajustées en conséquence.

### 5.7 Fond des cellules

À deux mètres de profondeur, le fond des cellules reposera sur l'argile silteuse. Bien que la résistance au cisaillement de l'argile soit de l'ordre de 50 kPa à cette profondeur, les lourds équipements de terrassement qui procéderont à l'excavation des matériaux ne pourront circuler directement sur l'argile silteuse en raison de la capacité portante qui est trop faible, ce qui contribuera à remanier l'argile.

La chaux vive pourrait probablement être utilisée pour améliorer la capacité portante de l'argile, mais les conditions de réalisation seront plutôt difficiles. En effet, il faudra utiliser des équipements de terrassement légers, ou du moins qui répartissent leur charge avec des chenilles larges. De plus, compte tenu que les travaux seront réalisés dans le fond des cellules, les chutes de pluie potentielles risquent de ralentir substantiellement l'avancement des travaux. Cependant, comme il a déjà été indiqué, des essais de laboratoire seraient nécessaires pour quantifier le gain potentiel de capacité portante avec de la chaux vive.

Finalement, on pourrait profiter des conditions de gel en hiver pour améliorer la traficabilité des équipements de terrassement sur le fond d'argile. Toutefois, cet aspect devra être analysé eu égard de la mise en place d'une géomembrane sous le point de congélation, ce qui peut générer des contraintes opérationnelles.



Nous espérons que ce rapport répondra aux attentes des divers intervenants au projet et nous demeurons à votre disposition pour toute information additionnelle.

**LABORATOIRES D'EXPERTISES DE QUÉBEC LTÉE**

Raymond Juneau, ing. M.Sc.A.  
Vice-président



RJ/lt

Québec, le 5 septembre 2001

Distribution:

- |  |          |
|--|----------|
| · Roche ltée Groupe-Conseil                | 4 copies |
| · Laboratoires d'Expertises de Québec ltée | 1 copie  |

---

En conformité avec les normes ISO 9001 et ISO/CEI Guide 25, vous êtes informés que ce rapport est composé de 54 pages. Il ne peut être reproduit en partie sans l'autorisation écrite de Laboratoires d'Expertises de Québec ltée.