

# Caractérisation géotechnique des argiles du Bas-Saint-Laurent

Kevin Hébert, Serge Leroueil et Ariane Locat  
Département de Génie Civil et de Génie des Eaux, Université Laval

Antony Gagné et Marie-Christine Delisle  
Service de la Géotechnique et de la Géologie, Direction du Laboratoire des Chaussées, Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports

## Mise en contexte et problématique

Étant donné que la zone la plus densément peuplée au Québec repose sur plusieurs dizaines de mètres de sols argileux, la conception d'ouvrages sur sols argileux est un aspect bien connu des géotechniciens de la province. Ces sols ont été déposés lors de la dernière période de glaciation, lorsque l'eau de mer a envahi les Basses-terres-du-Saint-Laurent suite au retrait de la calotte glaciaire. Il est important de connaître les propriétés géotechniques de ces argiles, afin de mieux prédire leur comportement lorsqu'elles sont sollicitées. Plusieurs travaux ont été réalisés afin de mieux comprendre les propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada, notamment par Leroueil et *al.* (1983). Plus localement, Locat (1976, 1977, 1978), Dionne (1977, 1995, 2002), Rappol (1993) et Héту (1998) ont tous contribué à l'amélioration des connaissances sur divers aspects géologiques de la région du Bas-Saint-Laurent, dont la compréhension des différents milieux de sédimentation, le mouvement des masses glaciaires de la dernière période glaciaire ainsi que sur les propriétés géotechniques des dépôts formés.

Le Ministère des Transports du Québec (MTQ) a comme mandat de réaliser le prolongement de l'autoroute 20, de Cacouna jusqu'à Rimouski, dans la région du Bas-Saint-Laurent. Plusieurs campagnes géotechniques ont été réalisées dans la région, révélant une anomalie stratigraphique concernant les dépôts de sols cohérents qui n'a jamais été caractérisée en détail. Cette anomalie est notamment identifiable sur le sondage au piézocône effectué dans la région de Trois-Pistoles (Figure 1). En effet, une partie du territoire présente une couche de sol cohérent très raide à dure qui repose sur une couche de sol de consistance ferme à raide. La consistance de la couche supérieure complique

grandement sa caractérisation (l'échantillonnage intact et la réalisation d'essais in-situ conventionnels) et donc, ses propriétés ne sont pas bien définies. De plus, la présence de cette couche rend difficile l'investigation de la couche inférieure, qui souvent contrôle le comportement des structures qui y sont construites.

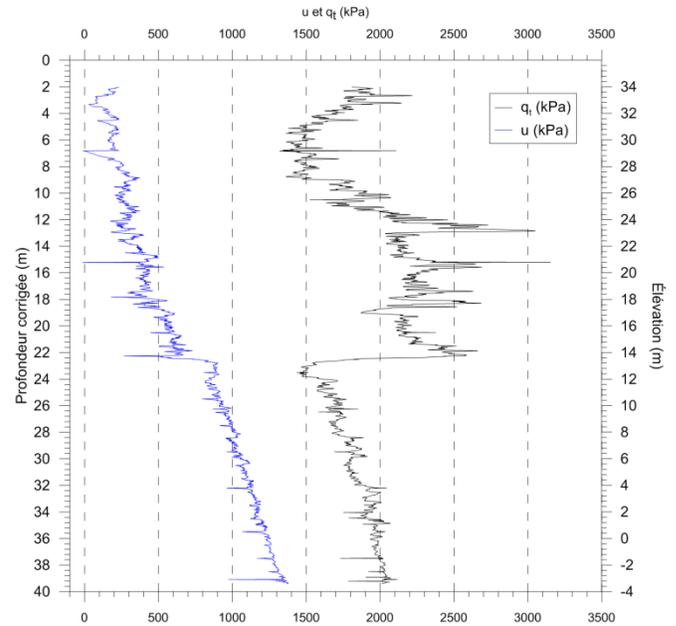


Figure 1 : Sondage CPTu C62006b réalisé près de Trois-Pistoles et montrant l'anomalie stratigraphique

Le projet de caractérisation géotechnique des argiles du Bas-Saint-Laurent visait donc à caractériser en détail ces dépôts et vérifier si les corrélations propres aux argiles de l'est du Canada (Leroueil et *al.*, 1983), grandement utilisées dans la pratique courante, peuvent s'appliquer aux argiles du Bas-Saint-Laurent, ou à établir de nouvelles corrélations en fonction des résultats obtenus. Un profil géotechnique complet a été fait sur deux sites spécifiques, soit le site de l'Isle-Verte et le site de Notre-Dame-des-Neiges, qui se situent à l'est de Rivière-du-Loup (Figure 2).

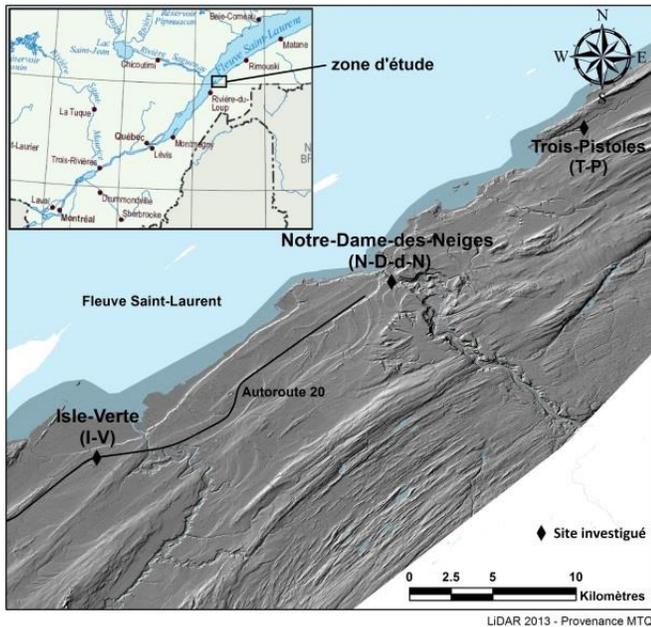


Figure 2 : Carte de localisation générale des sites d'étude

## Méthodologie

Une campagne d'investigation géotechnique a été effectuée à l'été 2014 afin de réaliser des essais de terrain ainsi qu'une campagne d'échantillonnage visant à caractériser ces dépôts à l'aide de plusieurs essais in-situ et en laboratoire. Ce projet s'est surtout concentré sur la réalisation d'essais de laboratoire qui ont mené à la caractérisation physico-chimique, minéralogique, mécanique et hydraulique des différentes unités de sol. Les données recueillies ont permis d'augmenter la quantité d'information déjà acquise par le MTQ lors d'anciennes campagnes géotechniques sur ces deux sites.

## Échantillonnage

Les essais au piézocône ont permis d'identifier 3 unités de sols, soit une couche très dense dans la partie supérieure, une couche inférieure de moins grande résistance et, localement, une couche intermédiaire qui séparent les 2 premières.

La campagne d'échantillonnage visait à récupérer des échantillons dans les différentes unités, mais principalement dans les unités supérieure et intermédiaire, qui n'avaient été que très peu étudiées. Étant donné la problématique due à la consistance des sols, deux techniques d'échantillonnage ont été utilisées, soit une technique de carottage à triple paroi

(calibre PQ<sub>3</sub>) et l'utilisation de tubes métalliques de 120,8 mm de diamètre intérieur. La technique de carottage permet de récupérer une carotte de 83 mm de diamètre, laquelle est partiellement isolée du fluide de forage grâce à une membrane interne, ce qui permet de limiter la contamination de l'échantillon par le fluide de forage. Cette méthode nécessite toutefois le paraffinage des échantillons sur place, selon la technique développée par La Rochelle *et al.* (1986). Deux types de tubes de 120,8 mm de diamètre ont été machinés, avec 3,1 mm et 6,35 mm d'épaisseur de paroi (Figure 3). Les tubes plus robustes permettent d'échantillonner le sol sans le déformer par la pression d'insertion et de récupérer un plus grand volume de sol de bonne qualité. Cette technique nécessite toutefois une forte capacité de poussée de la foreuse.



Figure 3 : Comparaison des tubes d'échantillonnage. De gauche à droite : tube shelby MTQ, tube de grand diamètre à paroi mince et tube de grand diamètre à paroi épaisse

## Caractéristiques géotechniques des sols argileux

Ces dépôts sont divisés en trois unités distinctes, qui sont toutes composées de silt argileux. L'unité supérieure est de consistance très raide à dure et est très surconsolidée, avec un rapport de surconsolidation variant entre 3 et 14 selon le site et la profondeur. La tomodynamétrie a révélé une structure massive et sans les laminations généralement observées dans les argiles déposées en milieu marin, telles

que les argiles de la mer de Champlain, et avec la présence de petits graviers. Les essais de caractérisation de base ont montré que le sol de l'unité supérieure possède une teneur en eau d'environ 20 % et un indice de liquidité près de 0. L'unité intermédiaire possède une consistance assez semblable à l'unité supérieure, mais est caractérisée par une transition graduelle par rapport aux différentes propriétés géotechniques. En effet, une diminution graduelle de la résistance est observée, accompagnée par une augmentation de la teneur en eau et de l'indice de liquidité. Le rapport de surconsolidation varie entre 1 et 2,7. L'unité inférieure présente des caractéristiques différentes des deux autres, notamment une résistance moins forte malgré une consistance ferme à raide, et des teneurs en eau plus élevées, autour de 30 %, correspondant à des indices de liquidité variant entre 0,4 et 0,8. La tomodynamométrie montre la présence de laminations, typique des sols argileux sédimentés, et une absence presque complète de graviers. Le rapport de surconsolidation est d'environ 1 à 1,3, indiquant un sol à peu près normalement consolidé, voire légèrement surconsolidé.

Les conditions hydrogéologiques aux deux sites sont très différentes de par leur emplacement respectif. Au site de l'Isle-Verte, situé dans une plaine, à une élévation d'environ 26 mètres, les conditions sont à peu près hydrostatiques, avec de légères surpressions en profondeur. Toutefois, le site de Notre-Dame-des-Neiges, situé à une élévation d'environ 87 mètres, près d'une forte pente, présente un fort gradient descendant et des pressions interstitielles aussi faibles que 35 kPa à des profondeurs de 30 mètres. Comme il s'agit d'un site bien drainé, le lessivage y est beaucoup plus important qu'au site de l'Isle-Verte. La salinité de l'eau varie entre 1,5 et 3,8 g/l, contrairement à l'Isle-Verte où la salinité augmente avec la profondeur de 15,7 à 28,6 g/l. Ce lessivage a donc un effet sur les limites de consistance, notamment sur la diminution de la limite de liquidité, faisant en sorte de diminuer l'indice de plasticité. Celui-ci est d'environ 20 à 25 % à l'Isle-Verte, tandis qu'il varie entre 5 et 12 % à Notre-Dame-des-Neiges.

Les essais physico-chimiques et minéralogiques montrent que les sols à l'étude sont assez semblables aux autres argiles de l'est du Canada. Néanmoins, les sites de l'Isle-Verte et de Notre-Dame-des-Neiges présentent un

pourcentage total en carbonates plus élevé (environ 4 à 8 %) qu'aux autres sites du Québec (environ 2 %), ceci étant probablement dû à la proximité de la formation de roches calcaires de Sayabec, un peu plus à l'est dans le Bas-Saint-Laurent (Locat, 1978). La porosimétrie au mercure et la microscopie électronique à balayage ont également montré que ces sols possèdent une structure interne très compacte et fermée, contrairement à la structure floculée très ouverte des autres argiles de l'est du Canada.

L'essai au piézocône permet d'obtenir un profil de résistance au cisaillement non drainé qui peut être calé avec des valeurs de  $S_u$  obtenues à l'essai scissométrique dans l'unité inférieure. Au site de l'Isle-Verte, la résistance au cisaillement non drainé moyenne est d'environ 60 kPa, tandis qu'elle est d'environ 120 kPa à Notre-Dame-des-Neiges. Pour les deux sites, le paramètre  $N_{KT}$  déduit est de 18, mais davantage de travaux permettraient de le définir avec plus de certitude. La valeur de  $N_{\sigma T}$  de 3,4 peut être utilisée pour obtenir un profil de  $\sigma'_p$ , mais elle provient de la relation déduite par Demers et Leroueil (2002), vu la difficulté d'obtenir des valeurs de  $\sigma'_p$  à l'essai oedométrique. La Figure 4 présente des exemples de courbes de consolidation obtenues pour les unités supérieure et inférieure des deux sites d'étude.

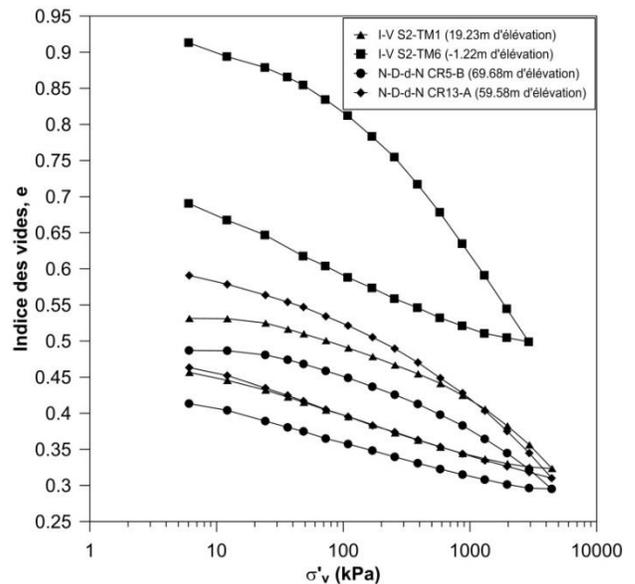


Figure 4 : Comparaison des courbes de consolidation pour les unités supérieure et inférieure des deux sites d'étude

Les résultats des essais oedométriques indiquent des sols très peu compressibles, avec des indices des vides naturels

( $e_0$ ) variant entre 0,54 et 0,94 à l'Isle-Verte et entre 0,44 et 0,61 à Notre-Dame-des-Neiges, associés à des indices de compression ( $C_c$ ) qui varient entre 0,1 et 0,25. Les courbes de consolidation obtenues ne montrent pas le cassé typique des argiles de la mer de Champlain, mais plutôt l'allure des sols ayant des indices des vides naturels très faibles. La pression de préconsolidation est donc très difficile à obtenir. Ces observations sont cohérentes avec les images obtenues au MEB. Les essais triaxiaux CIU ont mis en évidence le comportement dilatant de ces sols et ont permis de définir des paramètres de résistance effectifs moyens représentatifs des deux sites, avec un angle de frottement  $\phi' = 29^\circ$  et une cohésion  $c' = 10$  kPa dans le domaine normalement consolidé. À partir des données disponibles, il n'est pas possible de définir des paramètres de résistance drainés différents d'une unité à l'autre. Une plus grande quantité d'essais permettrait éventuellement de définir les enveloppes de résistance pour chacun des sites et des unités de sol. Les essais de conductivité hydraulique indiquent que la perméabilité initiale ( $k_0$ ) est plus faible que pour les argiles de l'est du Canada, soit autour de  $10^{-10}$  m/s.

Comme l'essai scissométrique ne peut pas être utilisé pour obtenir un profil de  $S_u$  dans les unités supérieure et intermédiaire, l'essai pressiométrique peut s'avérer une bonne solution afin d'obtenir une approximation de la résistance au cisaillement non drainé. Des valeurs du paramètre de corrélation  $\beta'$  entre 10 et 12,5 (Leroueil *et al.*, 1983) permettent d'estimer des  $S_u$  qui sont d'un ordre de grandeur similaire à celles déduites par l'essai au piézocône. De plus, l'essai de pénétration standard peut permettre d'obtenir une approximation préliminaire de  $S_u$  à partir des indices  $N$  et de la relation  $S_{uUU}/N_{60} = 5$  (Stroud, 1974). Les profils obtenus aux deux sites sont similaires à ceux obtenus avec les autres essais de caractérisation mécanique tels que le piézocône et le pressiomètre. Tout de même, il serait préférable d'utiliser des valeurs d'indices  $N$  corrigés ( $N_1$ )<sub>60</sub> pour en venir à utiliser cette relation. Celle-ci a été obtenue à partir de sols raides et n'est pas valide dans les argiles de l'est du Canada. Elle ne peut donc pas être utilisée pour l'unité inférieure des deux sites à l'étude, toutefois, ces corrélations nécessitent d'être validés par davantage de travaux afin d'augmenter la quantité de données, et doivent être utilisées avec prudence.

## Hypothèse de la mise en place des dépôts

Héty (1998) a mis en évidence des indices d'une réavancée glaciaire dans la région de Rimouski entre 12 400 et 12 000 ans B.P. Il est raisonnable d'affirmer que celle-ci ait pu avoir lieu entre 13 500 et 13 000 ans B.P. dans la région de Trois-Pistoles. Une datation dans l'unité intermédiaire du site de l'Isle-Verte sur un coquillage a donné une valeur de  $13\,480 \pm 30$  ans. L'hypothèse avancée est donc que suite à la déposition de matériau argileux jusqu'à des élévations d'environ 140 mètres (Dionne, 2002), une réavancée glaciaire ait pu déplacer du matériau argileux se trouvant à ces élévations plus importantes pour ensuite le déposer sur du matériau argileux déjà présent à des élévations plus faibles et ainsi former les dépôts supérieur et intermédiaire. Le fait qu'un coquillage daté ait été trouvé dans l'argile massive recouvrant les argiles glacio-marines tend à confirmer l'hypothèse de Héty (1998). Une datation de l'unité supérieure a donné un âge de  $15\,295 \pm 35$  ans B.P. Celle-ci est toutefois remise en question, car aucune autre analyse dans les sols de la région n'a donné un âge plus ancien que 14 200 ans B.P. (Héty, 1998). Une source externe de carbonate semble être la cause de contamination du coquillage échantillonné. Le fort degré de surconsolidation des dépôts supérieur et intermédiaire et les indices de liquidité près de 0 pourraient provenir d'un effet combiné du gel et du chargement par la masse glaciaire préalablement au déplacement. L'hypothèse nécessiterait plus de travaux afin de mieux comprendre le processus de mise en place, notamment afin de caractériser le contact entre les unités intermédiaire et inférieure. Pour l'instant il n'est pas possible de savoir s'il s'agit d'un charriage ou plutôt d'une resédimentation des unités supérieure et intermédiaire lors du relargage de cette masse de sol après le transport. Toutefois, une resédimentation impliquerait une certaine stratification de ces unités, ce qui n'est pas observé sur les images obtenues de la tomodynamométrie.

## Discussion et conclusion

Ce projet fait partie d'un ensemble plus vaste visant à détailler différents sites du Bas-Saint-Laurent étant caractérisés par une anomalie stratigraphique, ce qui permettra de faciliter les futurs travaux effectués dans la région. Pour le moment, les relations obtenues suite aux

différents essais ne sont pas appuyées par une quantité suffisante de données afin d'être utilisées en pratique. Toutefois, elles offrent un bon point de départ et des caractérisations géotechniques subséquentes permettront de combler le manque de données. Les essais de terrain traditionnels comme les essais scissométriques ne sont pas réalisables dans ces sols argileux très raides. Il faut donc explorer d'autres avenues, comme l'utilisation du piézocône, de l'essai pressiométrique et possiblement de l'essai de pénétration standard afin d'en déduire un profil de résistance au cisaillement non drainé. Les essais triaxiaux peuvent également fournir des paramètres de résistance à partir des échantillons récupérés par les deux méthodes d'échantillonnage utilisées pour ce projet. Le carottage PQ<sub>3</sub> et les tubes de grand diamètre donnent des résultats relativement similaires. Le carottage PQ<sub>3</sub> ne devrait être utilisé que lorsque les sols sont trop raides pour être récupérés par tubes de grand diamètre. La méthode par carottage nécessite de paraffiner sur place les échantillons récupérés, ce qui demande du personnel et du temps supplémentaire sur le terrain. Ce projet a donc permis de dresser un portrait global de ces sols argileux du Bas-Saint-Laurent et d'obtenir des informations quant à la mise en place de ces dépôts. L'hypothèse avancée sur la mise en place des dépôts nécessite aussi davantage de travaux de terrain et de laboratoire pour être confirmée, notamment par la caractérisation du contact entre les unités intermédiaire et inférieure. Tous les détails de ce projet se retrouvent dans le rapport final du projet (Hébert *et al.*, 2016).

## Remerciements

L'équipe de l'Université Laval tient à remercier toute l'équipe du Ministère des Transports du Québec pour l'aide et le soutien permettant la réalisation de ce projet de recherche.

## Références

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

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

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

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

HÉBERT, K., LEROUEIL, S. & LOCAT, A., 2016. *Caractérisation des argiles du Bas-Saint-Laurent*. Rapport final. Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des Transports, 391 p.

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

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

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

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

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

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

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